

(19) 世界知的所有権機関  
国際事務局



(43) 国際公開日  
2003 年 7 月 31 日 (31.07.2003)

PCT

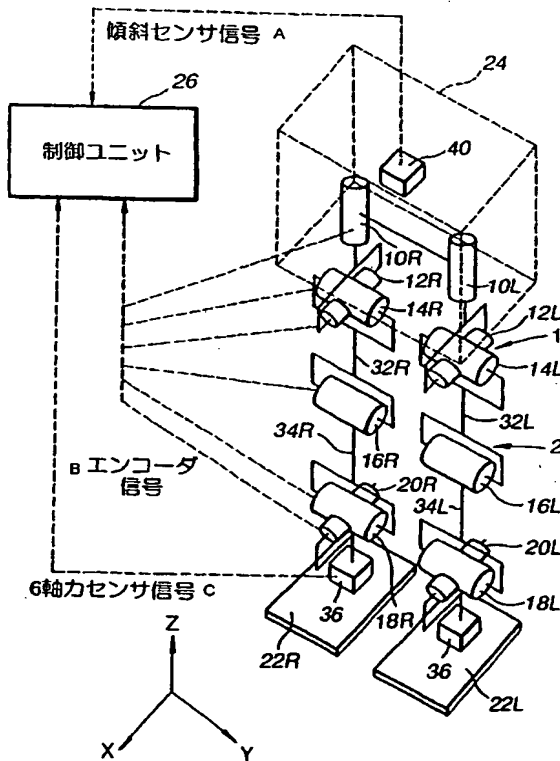
(10) 国際公開番号  
WO 03/061917 A1

- (51) 国際特許分類: B25J 5/00
- (21) 国際出願番号: PCT/JP03/00435
- (22) 国際出願日: 2003 年 1 月 20 日 (20.01.2003)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:  
特願2002-9891 2002 年 1 月 18 日 (18.01.2002) JP
- (71) 出願人 (米国を除く全ての指定国について): 本田技研工業株式会社 (HONDA GIKEN KOGYO KABUSHIKI KAISHA) [JP/JP]; 〒107-8556 東京都港区南青山二丁目 1 番 1 号 Tokyo (JP).
- (72) 発明者; および
- (75) 発明者/出願人 (米国についてのみ): 竹中 透 (TAKENAKA, Toru) [JP/JP]; 〒351-0193 埼玉県和光市中央 1 丁目 4 番 1 号 株式会社本田技術研究所内 Saitama (JP). 松本 隆志 (MATSUMOTO, Takashi) [JP/JP]; 〒351-0193 埼玉県和光市中央 1 丁目 4 番 1 号 株式会社本田技術研究所内 Saitama (JP). 吉池 孝英 (YOSHIIKE, Takahide) [JP/JP]; 〒351-0193 埼玉県和光市中央 1 丁目 4 番 1 号 株式会社本田技術研究所内 Saitama (JP).
- (74) 代理人: 佐藤 辰彦, 外 (SATO, Tatsuhiko et al.); 〒151-0053 東京都渋谷区代々木 2-1-1 新宿メインタワー 16 階 Tokyo (JP).
- (81) 指定国 (国内): JP, KR, US.

[続葉有]

(54) Title: CONTROLLER OF LEGGED MOBILE ROBOT

(54) 発明の名称: 脚式移動ロボットの制御装置



A...INCLINATION SENSOR SIGNAL  
26...CONTROL UNIT  
B...ENCODER SIGNAL  
C...SIX-AXIS FORCE SENSOR SIGNAL

(57) Abstract: While a corrected manipulated variable of a target floor reaction force (target floor reaction force moment) on the basis of the difference between an actual state quantity such as the upper-body posture angle of a robot (1) and a target state quantity is periodically determined, a target motion of the robot (1) is periodically determined by using the corrected manipulated variable and a dynamic model. At this time, a frictional force component for defining the frictional force between the robot (1) and a floor such as a translation floor reaction force horizontal component is used as a restriction object quantity to set the allowable range of the restriction object quantity. A target motion is so determined that the restriction object quantity within the allowable range, and that the resultant force of the inertia generated by the motion of the robot (1) on a dynamic model and the gravity balances with the floor reaction force determined by correcting the target floor reaction force with the corrected manipulated variable. The target motion is determined by adjusting motion modes with different generation ratios of the floor reaction moments to the translation floor reaction forces.

[続葉有]



(84) 指定国 (広域): ヨーロッパ特許 (DE, FR, GB).

添付公開書類:  
— 国際調査報告書

2文字コード及び他の略語については、定期発行される各PCTガゼットの巻頭に掲載されている「コードと略語のガイダンスノート」を参照。

---

(57) 要約:

ロボット1の上体姿勢角等の実状態量と目標状態量との偏差に基づいて、目標床反力（目標床反力モーメント）の修正操作量を逐次決定しつつ、その修正操作量と動力学モデルとを用いてロボット1の目標運動を逐次決定する。このとき、並進床反力水平成分等、ロボット1と床との間の摩擦力を規定する摩擦力成分を制限対象量とし、その制限対象量の許容範囲を設定する。目標運動を決定するときには、制限対象量が許容範囲内に収まり、且つ目標床反力を修正操作量により修正してなる床反力に、動力学モデル上でロボット1の運動が発生する慣性力と重力との合力が釣り合うように目標運動を決定する。目標運動は、床反力モーメントと並進床反力の発生比率が互いに異なる複数の運動モードを調整して決定する。

## 明 細 書

## 脚式移動ロボットの制御装置

## 技術分野

本発明は脚式移動ロボットの制御装置に関し、より具体的にはロボットの目標歩容を生成する内部モデルを備え、ロボット（実機）の挙動を内部モデルの挙動に追従させるようにしたものに関する。

## 背景技術

脚式移動ロボット、特に2足の脚式移動ロボットとしては、例えば特開昭62-97005号公報、特開昭63-150176号公報に記載されたものなどが知られている。また脚式移動ロボットを含むロボットの制御については、例えば「ロボット工学ハンドブック」（日本ロボット学会編、1990年10月20日）に詳しく説明されている。

ところで、脚式移動ロボット、特に2足の脚式移動ロボットは本来的に安定性が低いことから、外乱などを受けると姿勢が不安定となる。そこでロボットの上体の傾き角度（姿勢角）やその変化速度を検出し、それらの検出値に応じてロボットの姿勢制御を行なうことが望ましい。その意図から本出願人は先に特開平4-201187号公報等において、複数の着地候補位置を予め用意しておき、それらの着地候補位置の中から、一歩ごとの制御周期でいずれかの着地候補位置を選択して目標歩容を切り換える制御を提案している。

しかし、この制御によるときは、姿勢が崩れても、次の着地までは姿勢を復元させる効果が発生しないので、次の着地までに大きく姿勢が崩れてしまって、転倒してしまうおそれがある。また、姿勢が崩れた結果、

ZMP（垂直床反力の作用重心点で、床反力モーメントの水平成分が0となる点。Zero Moment Point）が存在可能範囲の限界付近に偏って接地性が失われても、次の一步で歩容が修正されて姿勢が復元するまではZMPが限界付近に偏ったままなので、それまで接地性を回復できない  
5 と言う不都合がある。

そこで本出願人は例えば特開平5-305579号公報において、次のような技術を提案している。この技術では、ロボットの力学モデルを基に力学的平衡状態が保証される様に床反力を設定した目標歩容が生成される。そして、モデル化誤差や外乱によってロボットの傾き角度と傾  
10 き角速度とがそれぞれの目標値と実際値との間で偏差を生じたときは、実ロボットの接地部の変位あるいはモーメントが基準歩容から故意にずらされる。これにより、実ロボットの床反力（実床反力）がモデルから計算される目標歩容の床反力から故意にずらされ、実ロボットの傾きをモデルの傾きに近づける復元力が得られる。なお、ここで言う「床反  
15 力」は、各脚体に作用する床反力を全て合成した、ある作用点に働く合力と合モーメントとを意味する。

しかし、この技術によるときは、例えば2足移動ロボットの片脚支持期では、実ロボットの床反力を故意に大きくずらそうとして足首角度を大きくずらしても、ZMPが足平接地面を超える全床反力を発生すること  
20 とができず、足平の一部が浮いてしまうことがある。従って、実ロボットがモデルに対して大きく傾いてしまった場合には、実ロボットの傾斜を正常に戻すために必要な十分な復元力を得ることができないことがある。そして、そのときは実ロボットが転倒する。即ち、特開平5-305579号公報の技術では、目標値と実際値との偏差を縮める復元作用  
25 がZMPの存在範囲に制約される。

図を用いて説明すると、実ロボットの関節変位をモデルの通りに追従



する制御においては、実ロボットの傾き角度と傾き角速度とがそれぞれモデルのそれらと一致していれば、図 6 1 に実線で示す実ロボットの ZMP はモデルから決定される目標 ZMP に一致し、ロボットは所期の姿勢で歩行する。しかし、実際には先に述べた様にモデル化誤差や外乱によって破線で示す様に傾き角度と傾き角速度とに偏差が生じ、しかもそのずれは重力の作用によって偏差が大きくなるほど益々大きくなろうとする発散傾向を持つ。ところで実 ZMP が目標 ZMP からずれると、図 6 2 に示す様に、その間の距離  $x$  に力  $F$  を乗じたモーメント  $M$  が目標 ZMP のまわりに生じる。換言すれば、実 ZMP が故意に目標 ZMP からずれる様に関節変位を制御することにより、所望のモーメントを生じさせることができる。先に提案した技術ではその思想に基づき、傾き（角度と角速度）偏差が生じたときは図 6 2 に示す様に、故意に実 ZMP をずらして姿勢復元方向にモーメントを生じさせる様にした。しかし、この技術によるときは同図に示す如く、実 ZMP をずらすことができる範囲は、足平領域  $x_{sole}$  内に限られる。従って、姿勢復元方向に発生させ得るモーメントには限界があり、ロボットの姿勢復元を適切に行なうことができない場合がある。

そこで、さらに本願出願人は、特開平 5 - 3 3 7 8 4 9 号公報等にて、次のような技術を提案している。すなわち、この技術では、ロボットの傾き偏差が生じたときには、上記の如く実 ZMP をずらして、目標 ZMP 回りに許容範囲内で姿勢復元方向のモーメントを発生させると共に、目標歩容を生成するために用いるモデル上で、目標 ZMP 回りにモーメントを発生させるように目標歩容の運動を決定する。このように、モデル上でモーメントを意図的に発生させることにより、実際のロボット上で姿勢復元方向のモーメントを発生させることと同等の効果を得ることができる。しかもこの場合、モデル上でのモーメントは、ZMP の存在

可能範囲を無視して任意に発生させることができる。このため、実際のロボット上で姿勢復元方向のモーメントを発生させることが困難な場合であっても、モデル上でのモーメントの発生によって、実際のロボットの姿勢を復元方向に適切に安定化することが可能となる。

- 5       しかしながら、この技術では、モデル上でのモーメントの発生は、ロボットの上体の水平方向並進加速度を調整する（ひいては、ロボットに作用する並進床反力水平成分を調整する）ことで行なわれる。このため、摩擦力の低い床でのロボットの移動を行なう場合や、ロボットの走行を行うときのように並進床反力の鉛直成分がかなり小さくなる（結果的に  
10   発生させ得る摩擦力も小さくなる）ような時期を有するロボットの移動を行なう場合には、ロボットのスリップを生じる恐れがあった。

従って、本発明の目的は、ロボットのスリップを生じることなく、安定した姿勢でロボットの移動を行なうことができる脚式移動ロボットの制御装置を提案することにある。

15

#### 発明の開示

- 本発明の脚式移動ロボットの制御装置は、上記の目的を達成するために、上体から延設された脚体を運動させて移動する脚式移動ロボットの目標運動の瞬時値を、少なくとも該ロボットの運動と床反力との関係を  
20   表す動力学モデルを用いて逐次決定しつつ、その決定した目標運動の瞬時値に追従させるように前記ロボットの動作制御を行なう脚式移動ロボットの制御装置において、少なくとも前記ロボットに作用する並進床反力水平成分又は並進床反力の床面平行成分又は該ロボットの全体重心加速度又は全体重心加速度の床面平行成分を制限対象量とし、該制限対象  
25   量の許容範囲を設定する許容範囲設定手段と、少なくとも前記決定された目標運動の瞬時値に対応するロボットの姿勢の目標状態量と該ロボッ

トの姿勢の実状態量との偏差に基づいて、前記目標運動の新たな瞬時値を、該新たな瞬時値に対応して前記動力学モデルに基づき定まる前記制限対象量が前記許容範囲内に収まるように決定する目標瞬時値決定手段とを備えたことを特徴とするものである（第1発明）。

5       なお、本発明（第1発明以外の発明を含む）において、前記並進床反力の水平成分又は該並進床反力の床面平行成分（詳しくは床面に平行な成分）又はロボットの全体重心加速度の水平成分又は該全体重心加速度の床面平行成分は、いずれも摩擦力に比例もしくはほぼ比例するものである。そこで、以下の説明では、便宜上、これらを総称的に摩擦力成分  
10       ということがある。

かかる第1発明によれば、目標運動の新たな瞬時値は、ロボットの姿勢の目標状態量と該ロボットの姿勢の実状態量との偏差に基づいて、その新たな瞬時値に対応して前記動力学モデルに基づき定まる前記制限対象量（摩擦力成分）が許容範囲内に収まるように決定されるので、前記  
15       制限対象量、すなわち摩擦力成分が許容範囲に収まり、且つロボットの姿勢の状態量（例えばロボットの上体の姿勢角や、重心位置等の状態量）に関する前記偏差を0に近づけることが可能となる目標運動の瞬時値を逐次決定できる。このため、この目標運動の瞬時値に追従させるようにロボットの動作制御を行うことにより、摩擦力の小さい床面や、並  
20       進床反力の鉛直成分が小さくなるよう時期を有するような歩容（例えば走行歩容）でロボットを移動させる場合においても、ロボットのスリップを生じることなく、安定した姿勢でロボットの移動を行なうことが可能となる。

かかる第1発明では、前記動力学モデルの運動は、少なくとも床反力  
25       モーメントと並進床反力との発生比率が互いに異なる前記ロボットの複数の運動モードを含み、前記目標瞬時値決定手段は、前記動力学モデル

の運動の複数の運動モードを少なくとも前記許容範囲に応じて調整して前記目標運動の新たな瞬時値を決定することが好ましい（第2発明）。

- この第2発明によれば、上記複数の運動モードを調整することによって、床反力モーメントと並進床反力とがそれぞれ任意の所望の値になる
- 5 ようなロボットの目標運動を決定することができることとなる。従って、前記制限対象量の許容範囲を考慮しつつ、前記複数の運動モードを少なくとも該制限対象量の許容範囲に応じて調整することによって、前記制限対象量としての摩擦力成分（これは並進床反力に依存する）が許容範囲に収まり、且つ、前記偏差を0に近づけるような床反力モーメントを
- 10 発生させ得る目標運動の瞬時値を決定できることとなる。例えば、ある1つの運動モードで、前記偏差を0に近づける方向の床反力モーメントを発生させている状態で、前記摩擦力成分が許容範囲を越えそうな場合には、当該1つの運動モードと、他の運動モードとを調整することによって、所望の床反力モーメントを維持しつつ、摩擦力成分を許容範囲内
- 15 に収めることが可能となる。

上記第2発明ではさらに、前記運動モードは、前記ロボットの重心を略一定に維持しつつ該ロボットの所定部位（例えばロボットの上体）の姿勢を変化させる姿勢変化運動と、該ロボットの上体の並進運動とを含むことが好適である（第3発明）。

- 20 これによれば、前記上体の並進運動によって、主に並進床反力を調整でき、また、前記姿勢変化運動によって並進床反力をほとんど変化させずに床反力モーメントを調整できるので、所望の床反力モーメントと所望の並進床反力（ひいては所望の摩擦力成分）とを発生させ得る目標運動の瞬時値の決定処理を容易に行なうことが可能となる。

- 25 さらに、上記第1～第3発明では、少なくとも前記動力学モデルの状態量に応じて前記ロボットの目標床反力及び／又は目標運動の現在以降

のパターンを決定するための歩容パラメータを修正する手段を備えることが好ましい（第4発明）。

これによれば、ロボットの目標床反力や目標運動の基本的なパターン（形態）を規定する歩容パラメータ（例えば目標ZMP（目標床反力中心点）の軌道を規定するパラメータ等）を、前記動力学モデルの状態量に  
5 応じて修正するので、動力学モデルの挙動の継続的な安定性を保ちながら、目標床反力や目標運動を決定することが可能となる。

また、前記第1発明では、より具体的には、前記ロボットの目標床反力の基準瞬時値を逐次決定する手段が備えられ、前記目標瞬時値決定手段は、少なくとも前記偏差と前記制限対象量の許容範囲とに応じて前記  
10 目標床反力の修正操作量を決定すると共に、該修正操作量により前記基準瞬時値を修正してなる床反力に、前記目標運動の新たな瞬時値により前記動力学モデル上で発生する慣性力と重力との合力を釣り合わせるように前記目標運動の新たな瞬時値を決定することが好ましい（第5発明）。

これによれば、前記偏差と制限対象量とを操作するための要素として、前記目標床反力の修正操作量が用いられる。そして、目標床反力は、特に制限対象量である摩擦力成分に対して直接的に影響する物理量であるから、制限対象量である摩擦力成分を許容範囲内に収めつつ、前記偏差  
20 を0に近づけ得るような好適な修正操作量を比較的容易に決定することが可能となる。その結果、摩擦力成分を許容範囲内に収めつつ、前記偏差を0に近づける上で好適な目標運動の新たな瞬時値を、演算負荷を軽減しつつ決定することが可能となる。

かかる第5発明では、前記第2発明や第3発明と同様の形態を採用することが好ましい。すなわち、前記動力学モデルの運動は、少なくとも床反力モーメントと並進床反力との発生比率が互いに異なる前記ロボッ  
25

トの複数の運動モードを含み、前記目標瞬時値決定手段は、前記動力学モデルの運動の複数の運動モードを少なくとも前記許容範囲に応じて調整して前記目標運動の新たな瞬時値を決定することが好ましい（第6発明）。さらに、該第6発明において、前記運動モードは、前記ロボット

5 の重心を略一定維持しつつ該ロボットの所定の部位の姿勢を変化させる姿勢変化運動と、該ロボットの上体の並進運動とを含むことが好ましい（第7発明）。

上記第6発明及び第7発明によれば、それぞれ前記第2発明及び第3発明と同様の作用効果を奏することができる。

10 さらに、前記第7発明では、前記目標瞬時値決定手段は、前記目標床反力の修正操作量により前記基準瞬時値を修正してなる床反力に前記合力を釣り合わせるために、前記姿勢変化運動および前記上体の並進運動のうち、該上体の並進運動を優先的に調整して前記目標運動の新たな目標瞬時値を決定することが好適である（第8発明）。

15 すなわち、上体の姿勢変化運動等、ロボットの重心回りの姿勢変化運動は、床反力モーメントを変化させるロボットの姿勢の変動が大きくなりやすい。これに対して、上体の並進運動は、その変化に対して並進床反力や床反力モーメントの変化の感度が比較的高い。従って、上体の並進運動の調整を優先することで、ロボットの姿勢の変動を極力抑えること

20 ができる。

また、前記第5～第8発明では、前記目標床反力の修正操作量を少なくとも前記偏差と前記制限対象量の許容範囲と前記動力学モデルの状態量とに応じて決定する手段を備えることが好ましい（第9発明）。

これによれば、前記目標床反力の修正操作量には、前記偏差（すなわち、実際のロボットの姿勢の状態量の偏差）だけでなく、動力学モデル

25 の状態量が加味されることとなる。このため、実際のロボットの姿勢の

安定性だけでなく、動力学モデルの挙動の安定性も確保することが可能となり、ひいては、ロボットの実際の安定した移動を行なう上で好適な目標運動の瞬時値を決定できることとなる。

5    なお、動力学モデルの状態量は、動力学モデル上でのロボットの重心位置や上体姿勢角、それらの変化速度等が挙げられる。

また、前記第 5 ～ 第 9 発明では、前記目標運動の瞬時値を決定するために用いる前記目標床反力の修正操作量及び／又は該修正操作量による前記動力学モデルの状態量の変化に応じて前記ロボットの目標床反力及び／又は目標運動の現在以降のパターンを決定するための歩容パラメータを修正する手段を備えることが好ましい（第 10 発明）。  
10

これによれば、ロボットの目標床反力や目標運動の基本的なパターン（形態）を規定する歩容パラメータ（例えば目標 Z M P（目標床反力中心点）の軌道を規定するパラメータ等）を、前記目標床反力の修正操作量やその修正操作量による動力学モデルの状態量の変化に応じて修正するので、動力学モデルの挙動の継続的な安定性を確保することが可能となる。  
15

また、前記第 5 ～ 第 10 発明では、前記偏差に応じて該偏差が 0 に近づくように床反力の第 1 要求操作量を決定する第 1 手段と、少なくとも該第 1 要求操作量に基づき前記ロボットの実床反力の目標値を規定する実床反力操作量と前記目標床反力の修正操作量とを決定する第 2 手段と、前記実床反力操作量と前記目標運動の瞬時値とに応じて前記ロボットの動作制御を行なう第 3 手段とを備えることが好ましい（第 11 発明）。  
20

これによれば、前記目標床反力の修正操作量によって動力学モデル上での床反力が操作されることに加えて、前記実床反力操作量によって実際のロボット上での実床反力が操作されることとなる。この結果、前記偏差を 0 に近づけるための床反力の操作を実際のロボットと、動力学モ  
25

デルとに分配することができ、実際のロボットの挙動の変化と動力学モデルの挙動の変化とを必要限に留めることができる。ひいては、実際のロボットの挙動をより一層安定化することができる。

この第11発明では、前記第1要求操作量、前記実床反力操作量、および前記目標床反力の修正操作量は、いずれも床反力作用点回りの床反力モーメント又は該床反力作用点の位置又はZMPに関する操作量であることが好適である（第12発明）。すなわち、ロボットの姿勢の安定性は、床反力作用点回りの床反力モーメント又は該床反力作用点の位置又はZMP（その点まわりの床反力モーメントの水平成分が0になる点）の位置が大きく影響するので、それらに関する操作量を第1要求操作量、前記実床反力操作量、および前記目標床反力の修正操作量として用いることにより、ロボットの姿勢の安定性の確保を確実にこなうことが可能となる。

さらに、上記第11あるいは第12発明では、前記第2手段は、前記実床反力操作量と前記目標床反力の修正操作量との差が前記第1要求操作量の増加に伴い単調に変化するように前記実床反力操作量と前記目標床反力の修正操作量とを決定することが好ましい（第13発明）。

これによれば、前記偏差を適正に0に近づけることが可能な実床反力操作量と目標床反力の修正操作量とを決定できる。なお、前記実床反力操作量と前記目標床反力の修正操作量との差が前記第1要求操作量の増加に伴い単調に変化するようにするためには、例えば、該差が前記第1要求操作量にほぼ一致するか、もしくは比例するように実床反力操作量と目標床反力の修正操作量とを決定すればよい。

上記第11～第13発明では、前記第2手段は、前記実床反力操作量を前記基準瞬時値に加えたものが所定の実床反力許容範囲内に収まるように該実床反力操作量を決定することが好ましい（第14発明）。これ



によれば、前記摩擦力成分（制限対象量）だけでなく前記実床反力操作量に対応する床反力成分、すなわち、床反力作用点回りの床反力モーメントや、該床反力作用点の位置、ZMPを所望の許容範囲内に収めることが可能となる。従って、ロボットの挙動の安定性をさらに高めることができる。

上記第14発明では、より具体的には、例えば前記第2手段は、前記第1要求操作量を前記基準瞬時値に加えたものが前記所定の実床反力許容範囲内の値であるときには、該第1要求操作量を前記実床反力操作量として決定すると共に、前記目標床反力の修正操作量を略0又は前記動力学モデルの状態量に応じて定めた値に決定し、前記第1要求操作量を前記基準瞬時値に加えたものが前記所定の実床反力許容範囲を逸脱する値であるときには、該実床反力許容範囲の限界値から前記基準瞬時値を差し引いたものを前記実床反力操作量として決定すると共に、少なくとも前記実床反力操作量と前記第1要求操作量との差分に応じて前記目標床反力の修正操作量を決定する（第15発明）。

これによれば、実床反力操作量の仮決定値を前記基準瞬時値に加えたもの（これはロボットの实床反力に相当する。以下、ここでは、実床反力推定値という）が前記実床反力許容範囲内に存在する場合には、該実床反力操作量によって実際のロボットの实床反力を操作することで、前記偏差が0に近づくように制御される。そして、上記実床反力推定値が実床反力許容範囲を逸脱した場合には、実床反力推定値が実床反力許容範囲内に収まるように制限した実床力操作量が決定される。このため、この実床反力操作量に応じてロボットの实床反力を操作したとき、実床反力を所定の実床反力許容範囲に収めることができる。さらに、実床反力推定値が実床反力許容範囲を逸脱した場合には、実床反力操作量が制限されるが、前記実床反力操作量と前記第1要求操作量との差分、すな

5 わち、前記偏差を0に近づけるための第1要求操作量のうち、実床反力操作量ではまかないきれない余剰分に応じて、目標床反力の修正操作量を決定するので、実床反力操作量に応じた実床反力の操作と、目標床反力の修正操作量に応じた動力学モデル上での床反力操作（目標運動の瞬時値の調整）とを併せて、前記偏差を0に近づけるようにすることができる。なお、実床反力推定値が実床反力許容範囲内に存在する場合において、目標床反力の修正操作量を動力学モデルの状態量に応じて決定したときには、該動力学モデルの挙動を安定化できる。

10 前記第14発明では、前記第2手段は、前記実床反力操作量と前記目標床反力の修正操作量との差が少なくとも前記第1要求操作量に応じた値になるように該実床反力操作量および目標床反力の修正操作量の仮決定値を求める手段と、その求めた目標床反力の修正操作量の仮決定値を用いて前記目標運動の新たな瞬時値を決定したと仮定した場合における当該目標運動の新たな瞬時値に対応する前記制限対象量の推定値を求め  
15 る手段と、前記求めた実床反力操作量の仮決定値を前記基準瞬時値に加えたものと前記制限対象量の推定値とを前記所定の実床反力許容範囲及び前記制限対象量の許容範囲と比較し、その比較結果に基づき該実床反力許容範囲及び該制限対象量の許容範囲の制限を満たす実床反力操作量および制限対象量の組を決定する手段と、その決定した実床反力操作量  
20 から前記第1要求操作量を差し引いたものと制限対象量とに基づき前記目標床反力の修正操作量を決定する手段とから構成するようにしてもよい（第16発明）。

25 この第16発明によれば、前記実床反力操作量と前記目標床反力の修正操作量との差が少なくとも前記偏差を0に近づけるための第1要求操作量に応じた値になるように該実床反力操作量及び目標床反力の修正操作量の仮決定値を求めた上で、修正操作量の仮決定値を用いて目標運動

の新たな瞬時値を決定したと過程した場合における前記制限対象量の推定値が求められる。そして、実床反力操作量の仮決定値を前記基準瞬時値に加えたもの（以下、ここでは仮実床反力という）と前記制限対象量の推定値とが実床反力許容範囲及び制限対象量の許容範囲と比較され、

5 それらの許容範囲の制限を満たす実床反力操作量および制限対象量の組が決定される。さらに、実床反力操作量から第1要求操作量を差し引いたものと制限対象量とに基づいて、目標床反力の修正操作量が決定される。

これにより、前記偏差を0に近づけ、且つ、実床反力操作量と制限対象量とをそれぞれの許容範囲に適正に収め得る実床反力操作量と修正操作量との組を決定できる。ひいては、ロボットの挙動の安定性を高めることができる。

なお、前記実床反力許容範囲および制限対象量の許容範囲の制限を満たす前記実床反力操作量と目標床反力の修正操作量との組は、探索的に

15 決定することも可能である。

上記第16発明では、前記動力学モデルの運動は、少なくとも床反力モーメントと並進床反力との発生比率が互いに異なる複数の運動モードを含んでおり、前記目標床反力の修正操作量は、各運動モードにそれぞれ対応する複数の操作量から構成されていることが好ましい（第17発明）。

20

これによれば、各運動モードに対応する各操作量を調整することで、前記動力学モデル上で所望の並進床反力と床反力モーメントとを発生させることができるので、特に制限対象量をそれに対する許容範囲内に収める上で好適な修正操作量を決定することが可能となる。なお、この第

25 17発明では、前記複数の運動モードは、前記第3発明あるいは第7発明と同様であることが好ましい。

前記第 1 1 発明では、前記動力学モデルの状態量に応じて該状態量を所定の状態量（基本的には動力学モデルの挙動を安定化できる状態量）に近づけるように床反力の第 2 要求操作量を決定する第 4 手段を備え、前記第 2 手段は、少なくとも前記第 1 要求操作量と前記第 2 要求操作量  
5 と前記許容範囲とに基づき前記実床反力操作量と前記目標床反力の修正操作量とを決定することがより好ましい（第 1 8 発明）。

これによれば、前記偏差を 0 に近づけ、且つ、動力学モデルの状態を安定化し、且つ、実床反力が実床反力許容範囲に収まり、且つ、制限対象量（摩擦力成分）がそれに対する許容範囲に収まるような目標運動の  
10 瞬時値を適正に決定し得る実床反力操作量と目標床反力の修正操作量とを適正に決定することが可能となる。

この第 1 8 発明では、前記第 1 2 発明の場合と同様、前記第 1 および第 2 要求操作量、前記実床反力操作量並びに前記目標床反力の修正量は、いずれも床反力作用点回りの床反力モーメント又は該床反力作用点の位置又は ZMP に関する操作量であることが好ましい（第 1 9 発明）。これによれば、第 1 2 発明と同様に、ロボットの姿勢の安定性の確保を確  
15 実にこなうことが可能となる。

さらに、第 1 8 発明および第 1 9 発明では、前記第 1 3 発明の場合と同様に、前記第 2 手段は、前記実床反力操作量と前記目標床反力の修正  
20 操作量との差が前記第 1 要求操作量の増加に伴い単調に変化するように前記実床反力操作量と前記目標床反力の修正操作量とを決定することが好ましい（第 2 0 発明）。

これによれば、前記第 1 3 発明と同様に、前記偏差を適正に 0 に近づけることが可能な実床反力操作量と目標床反力の修正操作量とを決定で  
25 きる。

さらに、上記第 1 8 ～第 2 0 発明では、前記第 1 4 発明の場合と同様

に、前記第2手段は、前記実床反力操作量を前記基準瞬時値に加えたものが所定の実床反力許容範囲内に収まるように該実床反力操作量を決定することが好ましい（第21発明）。

これによれば、第14発明と同様に、前記摩擦力成分（制限対象量）だけでなく前記実床反力操作量に対応する床反力成分、すなわち、床反力作用点回りの床反力モーメントや、該床反力作用点の位置、ZMPを所望の許容範囲内に収めることが可能となる。従って、ロボットの挙動の安定性をさらに高めることができる。

また、上記第21発明では、より具体的には、前記第16発明と同様の形態が好ましい。すなわち、前記第2手段は、前記実床反力操作量と前記目標床反力の修正操作量との差が少なくとも前記第1要求操作量に応じた値になり、且つ前記目標床反力の修正操作量が前記第2要求操作量に応じた値になるように該実床反力操作量および目標床反力の修正操作量の仮決定値を求める手段と、その求めた目標床反力の修正操作量の仮決定値を用いて前記目標運動の新たな瞬時値を決定したと仮定した場合における当該目標運動の新たな瞬時値に対応する前記制限対象量の推定値を求める手段と、前記求めた実床反力操作量の仮決定値を前記基準瞬時値に加えたものと前記制限対象量の推定値とを前記所定の実床反力許容範囲及び前記制限対象量の許容範囲と比較し、その比較結果に基づき該実床反力許容範囲及び該制限対象量の許容範囲の制限を満たす実床反力操作量および制限対象量の組を決定する手段と、その決定した実床反力操作量から前記第1要求操作量を差し引いたものと制限対象量とに基づき前記目標床反力の修正操作量を決定する手段とから構成されていることが好ましい（第22発明）。

この第22発明は、前記第1要求操作量に加えて、前記動力学モデルの状態量を所定の状態量に近づけるための第2要求操作量が考慮され、

前記実床反力操作量および目標床反力の修正操作量の仮決定値が、実床反力操作量と前記目標床反力の修正操作量との差が少なくとも前記第1要求操作量に応じた値になり、且つ前記目標床反力の修正操作量が前記第2要求操作量に応じた値になるように決定される。そして、これ以外  
5 は、前記16発明と同様である。

従って、第22発明によれば、前記偏差を0に近づけ、且つ、動力学モデルの挙動の安定性を高め、且つ、実床反力操作量と制限対象量とをそれぞれの許容範囲に適正に収め得る実床反力操作量と修正操作量との組を決定できる。ひいては、ロボットの挙動の安定性を高めることがで  
10 きる。

なお、前記実床反力許容範囲および制限対象量の許容範囲の制限を満たす前記実床反力操作量と目標床反力の修正操作量との組は、探索的に決定することも可能である。

また、上記第22発明では、前記第17発明と同様、前記動力学モデルの運動は、少なくとも床反力モーメントと並進床反力との発生比率が互いに異なる複数の運動モードを含んでおり、前記目標床反力の修正操作量は、各運動モードにそれぞれ対応する複数の操作量から構成されていることが好ましい（第23発明）。  
15

これによれば、前記第17発明と同様、特に制限対象量をそれに対する許容範囲内に収める上で好適な修正操作量を決定することが可能となる。なお、この第23発明においても、前記複数の運動モードは、前記第3発明あるいは第7発明と同様であることが好ましい。  
20

#### 図面の簡単な説明

25 図1は本発明の実施形態における脚式移動ロボットとしての2足移動ロボットの全体的構成の概略を示す概略図、図2は図1のロボットに備

えた制御ユニットの構成を示すブロック図、図3は第1実施形態における制御ユニットの機能的構成を示すブロック図、図4は図3の補償全床反力モーメント分配器110の機能を示すブロック図、図5はロボットの走行歩容を例示する説明図、図6は目標床反力鉛直成分の設定例を示す線図、図7は目標ZMPの設定例を示す線図、図8及び図9はロボットの運動モード（上体並進モード及び上体回転モード）の説明図、図110及び図11はロボットの動力学モデルの説明図である。図12は第1実施形態における歩容生成装置のメインルーチン処理を示すフローチャート、図13はロボットの上体位置の発散状態を示す説明図、図14は図12のフローチャートサブルーチン処理を示すフローチャート、図15は定常歩容足平着地位置姿勢及び座標系の関係を示す説明図、図16は定常歩容の目標床反力鉛直成分の設定例を示す線図、図17は定常歩容の床反力水平成分許容範囲の設定例を示す線図、図18は定常歩容の目標ZMPの設定例を示す線図、図19は図12のフローチャートのサブルーチン処理を示すフローチャート、図20は図19のフローチャートのサブルーチン処理を示すフローチャート、図21は図20のフローチャートのサブルーチン処理を示すフローチャート、図22は図21のフローチャートのサブルーチン処理を示すフローチャートである。図23～図30は、図21のフローチャートの要部の処理を説明するための線図、図31は定常歩容における上体位置の軌道の例を示す説明図、図32は図12のフローチャートのサブルーチン処理を示すフローチャート、図33は今回歩容の床反力水平成分許容範囲の設定例を示す線図、図34は図12のフローチャートのサブルーチン処理を示すフローチャート、図35は図34のフローチャートのサブルーチン処理を示すフローチャート、図36は図35のフローチャートのサブルーチン処理を示すフローチャート、図37は図36のフローチャートのサブルーチン処

理を示すフローチャート、図38は図37のフローチャートの要部の処理を説明するための線図、図39はZMP許容範囲の設定例を示す説明図である。図40は図12のフローチャートのサブルーチン処理を示すフローチャート、図41は図40のフローチャートのサブルーチン処理を示すフローチャート、図42は歩行歩容における目標床反力鉛直成分の設定例を示す線図である。図43は第2実施形態における制御ユニットの機能的構成を示すブロック図、図44は第2実施形態における歩容生成装置のメインルーチン処理を示すフローチャート、図45は図44のフローチャートのサブルーチン処理を示すフローチャート、図46は図45のフローチャートのサブルーチン処理を示すフローチャート、図47は第3実施形態における歩容生成装置の要部構成を機能的に示すブロック図、図48は第3実施形態における歩容生成装置のメインルーチン処理を示すフローチャート、図49は第3実施形態における歩容生成手法を機能的に示すブロック図、図50および図51は摂動モデルの説明図、図52～図55は制限対象量（床反力水平成分および床反力モーメント）の制限手法の説明図である。図56は第4実施形態における歩容生成手法を機能的に示すブロック図、図57および図58は第5実施形態における歩容生成手法を機能的に示すブロック図、図59は第6実施形態における歩容生成手法を機能的に示すブロック図、図60は第4～第6実施形態における要部の変形態様を示すブロック図、図61および図62は従来技術を説明するための説明図である。

#### 発明を実施するための最良の形態

以下、脚式移動ロボットとして2足移動ロボットを例にとり、本発明の実施形態を説明する。図1はそのロボット1を全体的に示す説明ス



ケルトン図である。図示の如く、ロボット1は上体24から下方に延設された左右一対の脚体（脚部リンク）2, 2を備える。両脚体2, 2は同一構造であり、それぞれ6個の関節を備える（理解の便宜のために各関節をそれを駆動する電動モータで示す）。該6個の関節は上体24側から順に、腰（股）の回旋用（上体24に対するヨー方向の回転用）の関節10R, 10L（符号R, Lはそれぞれ右側脚体、左側脚体に対応するものであることを意味する符号である。以下同じ）と、腰（股）のロール方向（X軸まわり）の回転用の関節12R, 12Lと、腰（股）のピッチ方向（Y軸まわり）の回転用の関節14R, 14Lと、膝部のピッチ方向の回転用の関節16R, 16Lと、足首部のピッチ方向の回転用の関節18R, 18Lと、足首部のロール方向の回転用の関節20R, 20Lとから構成される。

各脚体2の足首部の2つの関節18R（L）, 20R（L）の下部には、各脚体2の先端部を構成する足平22R（L）が取着されると共に、両脚体2, 2の最上位には各脚体2の股の3つの関節10R（L）, 12R（L）, 14R（L）を介して前記上体（筐体）24が設けられている。上体24の内部には制御ユニット26などが格納されている。なお、図1では図示の便宜上、制御ユニット26を上体24の外部に記載している。

上記構成の各脚体2においては、腰関節（股関節）は関節10R（L）, 12R（L）, 14R（L）から構成され、膝関節は関節16R（L）から構成され、足関節（足首関節）は関節18R（L）, 20R（L）から構成される。また、腰関節（股関節）と膝関節とは大腿リンク32R（L）で連結され、膝関節と足関節とは下腿リンク34R（L）で連結される。

なお、図示は省略するが、上体24の上部の両側部には左右一対の腕

対が取り付けられると共に、上体 24 の上端部には頭部が配置される。  
これらの腕体および頭部は、本発明の要旨と直接的な関連を有しないので詳細な説明は省略するが、各腕体は、それに備える複数の関節によって、該腕体を上体 24 に対して前後に振る等の運動を行なうことが可能  
5 となっている。

また、上記した各関節は電動モータからなり、更にはその出力を倍力する減速機などを備える。その詳細は先に本出願人が提案した特願平 1  
- 3 2 4 2 1 8 号、特開平 3 - 1 8 4 7 8 2 号などに述べられており、  
それ自体はこの発明の要旨とするところではないので、これ以上の説明  
10 は省略する。

各脚体 2 の上記構成により、各脚体 2 の足平 2 2 R (L) は、上体 2  
4 に対して 6 つの自由度を与えられている。そして、ロボット 1 の移動  
に際して両脚体 2, 2 を合わせて  $6 * 2 = 12$  個 (この明細書で「\*」  
はスカラに対する演算においては乗算を示し、ベクトルに対する演算に  
15 においては外積を示す) の関節をそれぞれ適宜な角度に駆動することで、  
両足平 2 2 R, 2 2 L の所望の運動を行なうことができる。これにより  
ロボット 1 は任意に 3 次元空間を移動することができる。

尚、この明細書で後述する上体 24 の位置および速度は、上体 24 の  
所定位置、具体的には上体 24 のあらかじめ定めた代表点 (例えば左右  
20 の股関節の間の中央点等) の位置およびその移動速度を意味する。同様  
に、各足平 2 2 R, 2 2 L の位置及び速度は、各足平 2 2 R, 2 2 L の  
あらかじめ定めた代表点の位置及びその移動速度を意味する。この場合、  
本実施形態では各足平 2 2 R, 2 2 L の代表点は、例えば各足平 2 2 R,  
2 2 L の底面上 (より具体的には各脚体 2 の足首関節の中心から各足平  
25 2 2 R, 2 2 L の底面への垂線が該底面と交わる点等) に設定される。

図 1 に示すロボット 1 において、各脚体 2 の足首関節 1 8 R (L),

20 R (L) と足平 22 R (L) との間には公知の 6 軸力センサ 36 が介装されている。該 6 軸力センサ 36 は、各脚体 2 の足平 22 R (L) の着地の有無と支持脚に床から作用する力の大きさと方向とを検出するためのものであり、床から足平 22 R (L) を介して各脚体 2 に伝達される床反力の X, Y, Z 方向の並進力成分  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  とその 3 方向まわりのモーメント成分  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$  の検出信号を制御ユニット 26 に出力する。また、各足平 22 R (L) の四隅には、各足平 22 R (L) の接地の有無を検出するための静電容量型の接地スイッチ 38 (図 1 では図示省略) が設けられ、その検出信号が該接地スイッチ 38 から制御ユニット 26 に出力される。さらに、上体 24 には、X-Z 平面内と Y-Z 平面内の z 軸に対する、即ち、重力方向 (鉛直方向) に対する上体 24 の傾斜角度 (姿勢角) とその角速度を検出するための傾斜センサ 40 が設置され、その検出信号が該傾斜センサ 40 から制御ユニット 26 に出力される。また各関節の電動モータ 46 (図 2 参照) には、その回転量を検出するためのエンコーダ (ロータリエンコーダ) 47 (図 2 参照) が設けられ、該エンコーダ 47 の検出信号が該エンコーダ 47 から制御ユニット 26 に出力される。更に、図 1 では省略するが、ロボット 1 の適宜な位置には傾斜センサ 40 の出力を補正するための原点スイッチ 42 と、フェール対策用のリミットスイッチ 44 とが設けられ、これらの出力が制御ユニット 26 に送られる。

さらに、図示を省略するが、ロボット 1 の外部には、該ロボット 1 の操縦用のジョイスティック (操作器) が設けられ、そのジョイスティックを操作することで、直進移動しているロボット 1 を旋回させるなど、ロボット 1 の歩容に対する要求を必要に応じて制御ユニット 26 に入力できるように構成される。この場合、入力できる要求は、例えばロボット 1 の移動時の歩容形態 (歩行、走行等)、遊脚の着地位置姿勢や着地

時刻、あるいはこれらの着地位置姿勢や着地時刻を規定する指令データ（例えばロボット1の移動方向、移動速度等）である。

図2は制御ユニット26の構成を示すブロック図である。該制御ユニット26はマイクロコンピュータにより構成されており、CPUからなる第1の演算装置60及び第2の演算装置62、A/D変換器50、カウンタ56、D/A変換器66、波形成回路58、RAM54、ROM64、並びにこれらの間のデータ授受を行なうバスライン52を備えている。この制御ユニット26では、前記各脚体2の6軸力センサ36、傾斜センサ40等の出力信号はA/D変換器50でデジタル値に変換された後、バスライン52を介してRAM54に入力される。また、ロボット1の各関節のエンコーダ（ロータリエンコーダ）47の出力はカウンタ56を介してRAM54に入力される。さらに、前記接地スイッチ38、原点スイッチ42、リミットスイッチ44などの出力は波形整形回路58を経てRAM54に入力される。

前記第1の演算装置60は後述の如く、目標歩容を生成すると共に、関節角変位指令（各関節の変位角もしくは各電動モータ32の回転角の目標値）を算出し、RAM54に送出する。また第2の演算装置62はRAM54から関節角変位指令と、前記エンコーダ47の出力信号に基づいて検出された関節角の実測値とを読み出し、各関節の駆動に必要な操作量を算出してD/A変換器66とサーボアンプ46aとを介して各関節を駆動する電動モータ46に出力する。

以上説明した構成は、以下に説明するいずれの実施形態においても共通の構成である。

図3は、本発明の第1実施形態におけるロボット1の制御装置の機能的構成を全体的に示すブロック図である。この図3中の「実ロボット」の部分以外の部分が制御ユニット26が実行する処理機能（主として第

1 の演算装置 60 及び第 2 の演算装置 62 の機能) によって構成されるものである。尚、以下の説明では、脚体 2 の左右を特に区別する必要がないときは、前記符号 R, L を省略する。

同図 3 を参照して、本実施形態の制御装置の動作の概要を説明すると、  
5 制御ユニット 26 は、歩容生成装置 100 により後述する如く目標歩容を生成する。この歩容生成装置 100 が生成して出力する目標歩容は、目標上体位置姿勢軌道 (上体 24 の目標位置及び目標姿勢の軌道)、目標足平位置姿勢軌道 (各足平 22 の目標位置及び目標姿勢の軌道)、目標腕姿勢軌道 (各腕体の目標姿勢の軌道)、目標 ZMP (目標全床反力  
10 中心点) 軌道、および目標全床反力軌道から構成される。尚、脚体 2 や腕体以外に、上体 24 に対して可動な部位を備える場合には、その可動部位の目標位置姿勢軌道が目標歩容に加えられる。

ここで、上記歩容における「軌道」は時間的変化のパターン (時系列パターン) を意味し、歩容生成装置 100 の制御周期 (演算処理周期)  
15 毎に算出される瞬時値の時系列により構成される。以下の説明では、「軌道」の代わりに「パターン」と称することもある。また、「姿勢」は空間的な向きを意味する。具体的には、例えば上体姿勢は Z 軸 (鉛直軸) に対するロール方向 (X 軸まわり) の上体 24 の傾斜角 (姿勢角) とピッチ方向 (Y 軸まわり) の上体 24 の傾斜角 (姿勢角) とで表され、  
20 足平姿勢は各足平 22 に固定的に設定された 2 軸の空間的な方位角で表される。本明細書では、上体姿勢は上体姿勢角ということもある。また、広義では、上体姿勢にヨー方向 (Z 軸まわり) の上体 24 の回転を含む場合もある。

尚、以下の説明では、誤解を生じるおそれがない場合には、しばしば  
25 「目標」を省略する。また、歩容のうちの、床反力に係わる要素 (目標 ZMP および目標全床反力) 以外の構成要素、すなわち足平位置姿勢、

上体位置姿勢等、ロボット1の各部の運動に係わる歩容を総称的に「運動」という。また、各足平22に作用する床反力（並進力及びモーメントからなる床反力）を「各足平床反力」と呼び、ロボット1の全て（2つ）の足平22R, 22Lについての「各足平床反力」の合力を「全床反力」という。ただし、以下の説明においては、各足平床反力はほとんど言及しないので、特に断らない限り、「床反力」は「全床反力」と同義として扱う。

目標床反力は、一般的には、作用点とその点に作用する並進力及びモーメントによって表現される。作用点はどこにとっても良いので、同一の目標床反力でも無数の表現が考えられるが、本明細書の実施形態では、目標ZMP（目標床反力中心点）を目標床反力の作用点とする。このとき、目標床反力のモーメント成分は、鉛直成分（鉛直軸（Z軸）まわりのモーメント）を除いて零になる。換言すれば、目標床反力中心点まわりの目標床反力のモーメントの水平成分（水平軸（X軸及びY軸）回りのモーメント）は零になる。

歩容生成装置100により生成される目標歩容のうち、目標上体位置姿勢（軌道）と目標腕姿勢（軌道）とは、ロボット幾何学モデル（キネマティクス演算部）102に直接送られる。

また、目標足平位置姿勢軌道、目標ZMP軌道（目標全床反力中心点軌道）、および目標全床反力軌道（詳細には目標並進床反力鉛直成分軌道、目標並進床反力水平成分軌道、目標ZMPまわりの目標床反力モーメント軌道）は、複合コンプライアンス動作決定部104に直接送られると共に、目標床反力分配器106にも送られる。そして、該目標床反力分配器106にて、目標床反力は各足平22R, 22Lに分配され、目標各足平床反力中心点および目標各足平床反力が決定される。この決定された目標各足平床反力中心点および目標各足平床反力は複合コンプ

ライアンス動作決定部104に送られる。

複合コンプライアンス動作決定部104では、目標足平位姿勢（軌道）を修正してなる機構変形補償付き修正目標足平位置姿勢（軌道）が求められ、この修正目標足平位置姿勢（軌道）がロボット幾何学モデル102に送られる。ロボット幾何学モデル102は、目標上体位置姿勢（軌道）と機構変形補償付き修正目標足平位置姿勢（軌道）を入力されると、それらを満足する両脚体2, 2の12個の関節（10R（L）など）の関節変位指令（値）をロボット1のキネマティクスモデル（剛体リンクモデル）に基づく逆キネマティクス演算によって算出し、その算出した関節変位指令を変位コントローラ108に送る。変位コントローラ108は、ロボット幾何学モデル102で算出された関節変位指令（値）を目標値としてロボット1の両脚体2, 2の12個の関節の変位を追従制御する。また、ロボット幾何学モデル102は、目標腕姿勢を満足する腕関節の変位指令（値）を算出して変位コントローラ108に送る。変位コントローラ108は、ロボット幾何学モデル102で算出された腕関節の関節変位指令（値）を目標値としてロボット1の腕体の10（もしくは8）個の関節の変位を追従制御する。

上記のような追従制御によるロボット1の実際の運動によって該ロボット1に生じた床反力（実各足床反力）は前記6軸力センサ36によって検出される。その検出値は前記複合コンプライアンス動作決定部104に送られる。

また、ロボット1に生じた実上体姿勢角偏差（目標上体姿勢角に対する実上体姿勢角の偏差）が前記傾斜センサ36によって検出され、その検出値は姿勢安定化制御演算部112に送られる。そして、該姿勢安定化制御演算部112は、与えられた実上体姿勢角偏差に基づいて、ロボット1の実上体姿勢角を目標上体姿勢角に復元する（実上体姿勢角偏差

を 0 に近づける) ための目標 ZMP まわりの補償全床反力モーメント  $M_{dmd}$  を適宜のフィードバック制御則により算出する。

より具体的には、本実施形態では、補償全床反力モーメント  $M_{dmd}$  は、例えば PD 制御則を用いて次式により決定される。

$$\begin{aligned} 5 \quad \text{補償全床反力モーメント } M_{dmd} = & K \theta b * \text{実上体姿勢角偏差} \\ & + K \omega b * \text{実上体姿勢角速度偏差} \\ & \dots\dots d 25 \end{aligned}$$

ここで、実上体姿勢角速度偏差は、実上体姿勢角偏差の時間微分値であり、目標上体姿勢角速度に対する実上体姿勢角速度の偏差を意味する。

- 10 また、実上体姿勢角偏差は、より詳しくは、ロボット 1 の上体 24 のロール方向 (X 軸回り) の姿勢角偏差と、ピッチ方向 (Y 軸回り) の姿勢角偏差とからなるベクトルであり、このことは補償全床反力モーメント  $M_{dmd}$  も同様である。

- 15 上記の如く決定された補償全床反力モーメント  $M_{dmd}$  は、補償全床反力モーメント分配器 110 により、コンプライアンス制御用目標床反力モーメントとモデル操作床反力モーメントとに分配される。換言すれば、実上体姿勢角偏差を基に、姿勢安定化制御演算部 112 及び補償全床反力モーメント分配器 110 により、コンプライアンス制御用目標床反力モーメントとモデル操作床反力モーメントとが決定される。

- 20 コンプライアンス制御用目標床反力モーメントは、実ロボット 1 の姿勢を目標歩容 (正確には修正歩容) に収束させて安定化させる (復元させる) ために実ロボット 1 に発生させる目標 ZMP まわりの床反力モーメントである。モデル操作床反力モーメントは、コンプライアンス制御用目標床反力モーメントと同じ目的のために後述する歩容生成用のロボット  
25 ット動力学モデルに発生させる目標 ZMP まわりの床反力モーメントである。モデル操作床反力モーメントは、言い換えると、最終的に決定さ



れた目標歩容（修正歩容）の運動が目標ZMPまわりに発生する床反力モーメントである。

これらの床反力モーメントは、以下のように決定される。まず、モデル操作床反力モーメントが次式で決定される。なお、床反力モーメント

5 許容範囲は、後述するごとく歩容生成装置100において決定される。

$M_{dmd} > \text{床反力モーメント許容範囲上限値}$ である場合

$$\text{モデル操作床反力モーメント} = -M_{dmd}$$

+ 床反力モーメント許容範囲上限値

$M_{dmd} < \text{床反力モーメント許容範囲下限値}$ である場合

10  $\text{モデル操作床反力モーメント} = -M_{dmd}$

+ 床反力モーメント許容範囲下限値

床反力モーメント許容範囲下限値  $\leq M_{dmd}$ 、且つ、 $M_{dmd} \leq \text{床反力モーメント許容範囲上限値}$ である場合

15  $\text{モデル操作床反力モーメント} = 0$

..... d 26

なお、上記式 d 26 では、補償全床反力モーメント  $M_{dmd}$  そのものを床反力モーメント許容範囲と比較しているが、本来は、上記式 d 26 で床反力モーメント許容範囲と比較すべき対象は、 $M_{dmd}$  を目標ZMPまわりの床反力モーメントの基準瞬時値に加えたものである。この場合、本実施形態では、目標ZMPまわりのモーメント（詳しくは水平成分）の基準瞬時値（歩容生成装置100が出力する目標全床反力のモーメントの水平成分）は常に「0」であるため、これに  $M_{dmd}$  を加えたものは、 $M_{dmd}$  に等しい。このため、上記の如く  $M_{dmd}$  を直接的に床反力モーメント許容範囲と比較するようにしている。

25 次に、コンプライアンス制御用目標床反力モーメントが次式で決定される。

コンプライアンス制御用目標床反力モーメント

$$=M_{dmd} + \text{モデル操作床反力モーメント} \quad \dots\dots d\ 2\ 7$$

従って、コンプライアンス制御用目標床反力モーメントとモデル操作床反力モーメントとの差が  $M_{dmd}$  に等しくなるようにそれらの床反力モーメントが決定される。

上記のような演算を行なう補償全床反力モーメント分配器 110 をブロック図で表すと、図4に示すようになる。

図3の説明に戻って、歩容生成装置 100 には前記決定されたモデル操作床反力モーメントが入力される。そして、詳細は後述するが、歩容生成装置 100 は、該歩容生成装置 100 において決定される目標 ZMP まわりの床反力モーメントがモデル操作床反力モーメントとなるように動力学モデルを用いて目標歩容の運動（特に上体位置姿勢軌道）を生成する。

また、前記決定されたコンプライアンス制御用目標床反力モーメントは、複合コンプライアンス動作決定部 104 に入力される。そして、複合コンプライアンス動作決定部 104 は、歩容生成装置 100 が生成する目標歩容の運動にロボット1の運動を追従させつつ、目標 ZMP まわりの実床反力モーメントがコンプライアンス制御用目標床反力モーメントに近づくように、目標足平位置姿勢を修正することにより、機構変形補償付き修正目標足平位置姿勢（軌道）を決定する。この場合、ロボット1の足平位置姿勢や床反力の全ての状態を目標に一致させることは事実上不可能であるので、これらの間にトレードオフ関係を与えて妥協的になるべく一致させる。すなわち、各目標に対する制御偏差に重みを与えて、制御偏差（あるいは制御偏差の2乗）の重み付き平均が最小になるように機構変形補償付き修正目標足平位置姿勢（軌道）を決定する。換言すれば、目標 ZMP まわりの実床反力モーメントと、ロボット1の

実際の足平位置姿勢とがそれぞれコンプライアンス制御用目標床反力モーメント、目標足平位置姿勢にできるだけ近づくように機構変形補償付き修正目標足平位置姿勢（軌道）が決定される。そして、複合コンプライアンス動作決定部 104 は、この修正目標足平位置姿勢をロボット幾何学モデル 102 に足平位置姿勢の最終的な目標値として出力することで、ロボット 1 の動作を制御する。

なお、この本発明の要旨は主に、歩容生成装置 100 における歩容生成の手法にあり、上記した複合コンプライアンス動作決定部 104 などの構成および動作は、本出願人が先に出願した特開平 10-277969 号公報などに詳細に記載されているので、説明を以上に止める。

次に、図 5 に示す走行歩容を例にして、歩容生成装置 100 が生成する目標歩容の概要を説明する。なお、以降の説明では、「床反力鉛直成分」は「並進床反力鉛直成分」を意味するものとし、床反力のうちのモーメントの鉛直成分（鉛直軸回り成分）は、「モーメント」という用語を用いて「床反力鉛直成分」と区別をする。同様に、「床反力水平成分」は「並進床反力水平成分」を意味するものとする。また、歩容における両脚支持期とは言うまでもなく、ロボット 1 がその自重を両脚体 2, 2 で支持する期間、片脚支持期とはいずれか一方のみの脚体 2 でロボット 1 の自重を支持する期間、空中期とは両脚体 2, 2 が床から離れている（空中に浮いている）期間を言う。片脚支持期においてロボット 1 の自重を支持しない側の脚体 2 を「遊脚」と呼ぶ。但し、本実施形態で主に説明する走行歩容では、両脚支持期は無く、片脚支持期（着地期）と空中期とが交互に繰り返される。この場合、空中期では両脚 2, 2 とも、ロボット 1 の自重を支持しないこととなるが、該空中期の直前の片脚支持期において遊脚であった脚体 2、支持脚であった脚体 2 をそれぞれ該空中期においても遊脚、支持脚と呼ぶ。

まず、図5に示す走行歩容を説明すると、この走行歩容は、人間の通常の走行歩容と同様の歩容である。この走行歩容では、ロボット1の左右いずれか一方のみの脚体2（支持脚）の足平22が着地（接地）する片脚支持期と、両脚体2, 2が空中に浮く空中期とが交互に繰り返される。図5の1番目の状態は片脚支持期の開始時（初期）の状態、2番目の状態は片脚支持期の中間時点の状態、3番目の状態は片脚支持期に続く空中期の開始時（片脚支持期の終了時）の状態、4番目の状態は空中期の中間時点の状態、5番目の状態は空中期の終了時（次の片脚支持期の開始時）の状態を示している。

- 10 この走行歩容では、ロボット1は、図5の1番目の状態で示すように、片脚支持期の開始時において支持脚（ロボット1の進行方向前側の脚体2）側の足平22のかかとで着地する。続いて、図5の2番目の状態で示すように、ロボット1は、着地した足平22（支持脚側の足平22）の底面のほぼ全面を着地させた後、図5の3番目の状態で示すように、
- 15 その支持脚側の足平22（図5の3番目の状態におけるロボット1の進行方向後側の脚体2の足平22）のつま先で床を蹴って空中に飛び上がる。これより片脚支持期が終了すると共に空中期が開始する。尚、片脚支持期における遊脚は、図5の1番目の状態で示すように、片脚支持期の開始時では、支持脚の後側に存在するが、図5の2番目及び3番目の
- 20 状態で示すように次の着地予定位置に向かって支持脚の前側に振り出される。次いで、図5の4番目の状態で示す空中期を経た後、ロボット1は、遊脚（空中期の開始直前の片脚支持期で遊脚となっていた脚体2）の足平22のかかとで着地し、次の片脚支持期が開始される。

- 図5の走行歩容を考慮しつつ、前記歩容生成装置100が生成する目標歩容の基本的な概要を説明する。なお、歩容に関する詳細は、先に本願出願人が提案した特開平10-86081号公報にも記載されている
- 25

ので、以下では、特開平10-86081号公報に記載されていない内容を主に説明する。

詳細は後述するが、歩容生成装置100が目標歩容を生成するとき、遊脚側の足平22の着地位置姿勢（着地予定位置姿勢）や着地時刻（着地予定時刻）等の目標歩容生成用の基本的な要求値（要求パラメータ）が、ジョイスティック（ロボット1の操作器）等の所要の操作等に応じて歩容生成装置100に与えられる。そして、歩容生成装置100は、その要求パラメータを用いて目標歩容を生成する。より詳しく言えば、歩容生成装置100は、上記要求パラメータに応じて、目標歩容の目標足平位置姿勢軌道、目標床反力鉛直成分軌道等、目標歩容の一部の構成要素を規定するパラメータ（歩容パラメータという）を決定した上で、その歩容パラメータを用いて目標歩容の瞬時値を逐次決定し、該目標歩容の時系列パターンを生成する。

この場合、目標足平位置姿勢軌道（より詳しくは、足平の位置及び姿勢の空間的な各成分（X軸成分等）の目標軌道）は、例えば本出願人が特許第3233450号にて提案した有限時間整定フィルタを用いて各足平22毎に生成される。この有限時間整定フィルタは、可変時定数の1次遅れフィルタ、すなわち、伝達関数が $1/(1+\tau s)$ の形で表されるフィルタ（ $\tau$ は可変の時定数。以下、このフィルタを単位フィルタという）を複数段（本実施形態では3段以上）、直列に接続したものであり、所望の指定時刻に指定値に到達するような軌道を生成・出力することができるものである。この場合、各段の単位フィルタの時定数 $\tau$ は、いずれも、有限時間整定フィルタの出力生成を開始してから、上記指定時刻までの残時間に応じて逐次可變的に設定される。より詳しくは、該残時間が短くなるに伴い $\tau$ の値が所定の初期値（ $>0$ ）から減少されていき、最終的には、該残時間が0になる指定時刻にて、 $\tau$ の値が0にな

るように設定される。そして、有限時間整定フィルタには、前記指定値（より詳しくは、有限時間整定フィルタの出力の初期値から前記指定値への変化量）に応じた高さのステップ入力を与えられる。このような有限時間整定フィルタは、指定時刻にて指定値に達するような出力が生成されるだけでなく、指定時刻における有限時間整定フィルタの出力の変化速度を0もしくはほぼ0にすることができる。特に、単位フィルタを3段以上（3段でよい）、接続した場合には、有限時間整定フィルタの出力の変化加速度（変化速度の微分値）をも0もしくはほぼ0にすることができる。

- 10   このような有限時間整定フィルタを用いる足平位置姿勢軌道（足平22が着地してから次に着地するまでの位置姿勢軌道）の生成は、例えば次のように行なわれる。例えばX軸方向（前後方向）の目標足平位置軌道は次のように生成される。すなわち、前記要求パラメータにより定まる各足平22の次の着地予定位置のX軸方向位置（より詳しくは、次の
- 15   着地予定位置のひとつ前の着地位置に対するX軸方向の変化量（移動量）。これは前記指定値に相当する）に応じて有限時間整定フィルタへのステップ入力の高さが決定されると共に前記時定数 $\tau$ が所定の初期値に初期化された後、その決定されたステップ入力有限時間整定フィルタに与えられ、足平22のX軸方向位置の軌道生成が開始される。そして、
- 20   この軌道生成時には、前記時定数 $\tau$ は、足平22の着地予定時刻（これは前記指定時刻に相当する）までに初期値から0まで減少していくように、逐次可変設定される。これにより、着地予定時刻で着地予定位置に達するような、足平22のX軸方向の位置の軌道が生成される。

- また、Z軸方向（鉛直方向）の目標足平位置軌道は、例えば次のよう
- 25   に生成される。すなわち、まず、足平22の次の着地予定位置及び着地予定時刻に応じて、該足平22の高さ（鉛直位置）が最大になるときの

該足平 2 2 の Z 軸方向位置（以下、最高点位置という）とその最高点位置への到達時刻とが決定される。そして、その最高点位置（これは前記指定値に相当する）に応じて有限時間整定フィルタへのステップ入力の高さが決定されると共に時定数  $\tau$  が初期化された後、その決定されたステップ入力がある有限時間整定フィルタに与えられ、前記最高点位置までの Z 軸方向の足平位置軌道が逐次生成される。この際、時定数  $\tau$  は、最高点位置への到達時刻（前記指定時刻に相当）までに初期値から 0 まで減少するように逐次可変設定される。さらに、最高点位置までの Z 軸方向位置の軌道の生成が終了したら、時定数  $\tau$  を初期化すると共にいままでのステップ入力と逆極性のステップ入力（より詳しくは、最高点位置から次の着地予定位置までの Z 軸方向の変化量（これは前記指定値に相当する）に応じた高さの逆極性のステップ入力）がある有限時間整定フィルタに入力され、該最高点位置から着地予定位置までの Z 軸方向の足平位置の軌道が逐次生成される。この際、時定数  $\tau$  は足平 2 2 の着地予定時刻までに初期値から 0 まで減少するように逐次可変設定される。

尚、Z軸方向の足平位置軌道の生成においては、時定数 $\tau$ を軌道生成開始時刻から足平22の着地予定時刻まで、初期値から0まで継続的に減少するように可変設定すると共に、最高点位置への到達時刻もしくはその近傍時刻で、ステップ入力の極性を逆極性に切り替えることで、Z軸方向の足平位置軌道を生成するようにしてもよい。この場合には、足平22を所望の最高点位置に精度よく到達させることはできないが、着地予定時刻での着地予定位置への到達は問題なく行なうことができる。

足平姿勢軌道についても、上述した足平位置軌道と同様に有限時間整定フィルタを用いて生成することができる。この場合、足平姿勢の空間的な各成分のうち、その姿勢の角度変化が単調的（単調増加もしくは単調減少）なものとなる成分については、前記したX軸方向の足平位置軌

道の生成と同様に足平姿勢軌道を生成すればよい。また、姿勢の角度変化が極大値もしくは極小値をもつような成分については、前記したZ軸方向の足平位置軌道の生成と同様に足平姿勢軌道を生成すればよい。

尚、上記のように有限時間整定フィルタにより生成される目標足平位置姿勢軌道は、床面に固定された後述の支持脚座標系での各足平22の目標位置姿勢軌道である。

上述のように生成される目標足平位置姿勢軌道は、各足平22の位置が、その初期接地状態（目標歩容の初期時刻の状態）から着地予定位置に向かって徐々に加速しながら移動を開始するように生成される。そして、該目標足平位置姿勢軌道は、最終的に着地予定時刻までに徐々に位置の変化速度を0またはほぼ0にまで減速し、着地予定時刻にて着地予定位置に到達して停止するように生成される。このため、各足平22の着地瞬間における対地速度（床に固定された支持脚座標系での各足平22の位置の変化速度）が0またはほぼ0になる。したがって、走行歩容において同時に全脚体2, 2が空中に存在する状態（空中期での状態）から着地しても、着地衝撃が小さくなる。

前記走行歩容においては、ロボット1に作用する重力によって空中期後半から上体24の鉛直速度は下向きになり、着地時でも下向きのままである。したがって、上記のように各足平22の着地瞬間における対地速度が0またはほぼ0になるように目標足平位置姿勢軌道を生成すると共に、後述する如く動力的平衡条件を満たすように上体24の目標位置姿勢軌道を生成したとき、着地直前において、上体24に対する遊脚側の足平22の相対速度は、上向きになる。すなわち、走行歩容の着地瞬間では、ロボット1の目標歩容は遊脚側の脚体22を上体24側に引っ込めながら着地するような歩容となる。言い換えれば、本実施例での目標歩容では、ロボット1は、着地瞬間において、遊脚側の足平22の



対地速度が0またはほぼ0になるように、上体24から見て該足平22を引き上げるようにして着地する。これによって、着地衝撃は小さくなり、着地衝撃が過大になるのを防止するようにしている。

また、本実施形態では、有限時間整定フィルタは、単位フィルタを3  
5 段以上（例えば3段）、直列に接続したものであるため、着地予定時刻までに各足平22の速度（足平位置の変化速度）が0またはほぼ0になるだけでなく、各足平22は、その加速度も着地予定時刻にて0またはほぼ0になって停止する。つまり、着地瞬間における対地加速度も0またはほぼ0になる。したがって、着地衝撃がより一層小さくなる。特に、  
10 実際のロボット1の着地時刻が目標の着地時刻からずれても、衝撃があまり増大しなくなる。補足すると、着地予定時刻にて各足平22の対地速度を0またはほぼ0にする上では、有限時間整定フィルタの単位フィルタの段数は2段でもよいが、この場合には、着地予定時刻での各足平22の加速度は一般には0にならない。

15 尚、足平姿勢に関しては、各足平22が着地予定時刻にてその踵で着地した後、該足平22の底面のほぼ全面が床に接地するまで動き続ける。このため、該足平22の底面のほぼ全面が床に接地する時刻を前記指定時刻に設定して、前記有限時間整定フィルタにより足平姿勢軌道が生成される。

20 また、本実施形態では、有限時間整定フィルタを用いて足平位置軌道を生成したが、着地予定時刻での足平位置の変化速度が0またはほぼ0になる（足平位置の時間微分値が0になる）ように、さらには、該着地予定時刻での足平位置の変化加速度（変化速度の時間微分値）が0またはほぼ0になるように設定された多項式などの関数を用いて目標足平位置軌道を生成するようにしても良い。このことは、目標足平姿勢軌道の  
25 生成に関しても同様である。但し、該目標足平姿勢軌道の生成に関して

は、上述の如く、各足平 2 2 の底面のほぼ全面が床に接地する時刻にて、各足平 2 2 の姿勢の変化速度、さらにはその変変化加速度が 0 またはほぼ 0 になるように多項式などの関数が設定される。

歩容生成装置 1 0 0 は目標床反力鉛直成分を明示的に設定する。この

5 目標床反力鉛直成分軌道は、例えば図 6 のように設定される。本実施形態では、走行歩容における目標床反力鉛直成分軌道の形状（詳しくは片脚支持期での形状）は、台形状（床反力鉛直成分の増加側に凸の形状）に定められており、その台形の高さ、折れ点の時刻を目標床反力鉛直成分軌道を規定する歩容パラメータとして、それらの歩容パラメータ（床

10 反力鉛直成分軌道パラメータ）が決定される。尚、走行歩容の空中期では、目標床反力鉛直成分は定常的に 0 に設定される。この例のように、目標床反力鉛直成分軌道は、実質的に連続になるように（値が不連続にならないように）設定するのが良い。これは床反力を制御する際のロボット 1 の関節の動作を滑らかにするためである。ここで、「実質的に連

15 続」というのは、アナログ的に連続な軌道（真の意味での連続な軌道）を離散時間系でデジタル表現したときに必然的に生じる値の飛びは、該軌道の連続性を失わせるものではないということを意味するものである。

目標 Z M P 軌道は次のように設定される。図 5 の走行歩容においては、前記したように支持脚側足平 2 2 のかかとで着地し、次にその支持脚側

20 足平 2 2 のつま先で蹴って空中に飛び上がり、最後に遊脚側足平 2 2 のかかとで着地する。したがって、片脚支持期での目標 Z M P 軌道は、図 7 の上段図に示すように、支持脚側足平 2 2 のかかとを初期位置として、次に支持脚側足平 2 2 の底面のほぼ全面が接地する期間において該足平 2 2 の前後方向の中央に移動し、その後、離床時まで支持脚側足平 2

25 2 のつまさきに移動するように設定される。ここで、図 7 の上段図は、X 軸方向（前後方向）の目標 Z M P 軌道を示すものであり、図 7 の下段

図はY軸方向（左右方向）の目標ZMP軌道を示すものである。尚、片脚支持期におけるY軸方向の目標ZMP軌道は、図7の下段図に示すように、Y軸方向での支持脚側脚体2の足首関節の中心位置と同じ位置に設定される。

- 5 図7の上段図に示すように、空中期における目標ZMP軌道のX軸方向位置は、次の遊脚側脚体2の着地までに支持脚側足平22のつまさきから遊脚側足平22のかかとの着地位置まで連続的に移動するようにした。また、図7の下段図に示すように、空中期における目標ZMP軌道のY軸方向位置は、次の遊脚側脚体2の着地までに支持脚側脚体2の足首関節の中心のY軸方向位置から遊脚側脚体2の足首関節の中心のY軸方向位置まで連続的に移動するようにした。すなわち、歩容の全期間において目標ZMP軌道を連続（実質的に連続）にした。ここで、上記したZMP軌道の「実質的に連続」の意味は、前記床反力鉛直成分軌道の場合と同様である。
- 10
- 15 なお、目標歩容の生成に用いる動力学モデルの近似精度等を考慮すると、目標歩容の目標運動をできるだけ連続的なものとする上で、目標ZMP軌道は上記のように空中期でも実質的に連続であることが望ましい。但し、本実施形態で用いる後述の動力学モデルでは、必ずしも目標ZMPが連続的である必要はない。また、本実施形態では、図7に示したような目標ZMP軌道の折れ点の位置や時刻が、ZMP軌道パラメータ（目標ZMP軌道を規定するパラメータ）として設定される。
- 20

ZMP軌道パラメータは、安定余裕が高く、かつ急激な変化をしないように決定される。ここで、ロボット1の接地面を含む最小の凸多角形（いわゆる支持多角形）の中央付近に目標ZMPが存在する状態を安定

25 余裕が高いと言う（詳細は特開平10-86081号公報を参照）。図7の目標ZMP軌道はこのような条件を満たすように設定したものであ

る。

また、目標腕姿勢は、上体24に対する相対姿勢で表される。

また、目標上体位置姿勢、目標足平位置姿勢および後述の基準上体姿勢はグローバル座標系で記述される。グローバル座標系は床に固定された座標系であり、より具体的には、後述する支持脚座標系が用いられる。

本実施形態では、歩容生成装置100は、目標上体姿勢だけでなく、基準上体姿勢も生成する。この基準上体姿勢は、歩容に対する要求（歩容生成装置100に対する行動計画部などの装置または外部（前記ジョイスティック等）からの要求）にそのまま従って生成される上体姿勢である。

目標上体姿勢（以降、「基準」が付いていない場合には、目標上体姿勢を表す）は、長期的には基準上体姿勢に追従するかまたは一致するように生成される。

目標上体姿勢は、歩行においては、本願出願人による特願2000-352011号の明細書に記載した実施形態のごとく通常、常に基準上体姿勢に一致させておけば良い。特願2000-352011号では、基準上体姿勢という概念は記載されていないが、目標上体姿勢パターンを、明示的かつ優先的に与えていたので、基準上体姿勢に目標上体姿勢が常に一致していることと同じことである。

しかし、走行など空中期がある歩容や低摩擦床面での歩行においては、単に上体水平加速度を調整するだけでは、目標歩容の床反力水平成分が許容範囲以内（あるいは摩擦限界以内）に存在するようにしつつ動力学的平衡条件を満足することができない。

そこで、本実施形態においては、目標上体姿勢を必要に応じて基準上体姿勢から故意にずらすこととした。より具体的には、以下に説明するふたつの運動モードを複合的に発生させることにより、目標歩容の床反

力水平成分が許容範囲以内（あるいは摩擦限界以内）に存在するようにした。

図8のように、ロボット1のある運動状態から、上体水平加速度だけを摂動（微小変化）させると、ロボット1の全体重心水平加速度と全体重心まわりの角運動量が摂動する。すなわち、上体水平加速度の摂動は、  
5 それによって発生するロボット1の慣性力と重力との合力に対して動力学的に釣り合う床反力鉛直成分を摂動させずに（ロボット1の全体重心鉛直加速度を摂動させずに）、目標ZMPまわりの床反力モーメント成分（ただし鉛直軸まわり成分を除く）と床反力水平成分とを摂動させる。  
10 このようにロボット1の上体水平加速度を摂動させる運動モードを上体並進モードと呼ぶ。

言いかえると、床反力鉛直成分を変化させずに、目標ZMPまわりの床反力モーメント成分（ただし鉛直軸まわり成分を除く）と床反力水平成分とを変化させる運動を上体並進モードと呼ぶ。

15 この時の単位加速度当たりの床反力モーメント成分の変化を $\Delta M_p$ 、単位加速度当たりの床反力水平成分の変化を $\Delta F_p$ とする。図8に示す状況で上体24を前方に水平加速すると、 $\Delta M_p$ と $\Delta F_p$ は図8に示す矢印の向きに作用する。

20 感覚的に判り易くするために、運動によって発生する慣性力と重力との合力に釣り合う床反力を用いて表現したが、慣性力と重力との合力を用いて表現した方が、理論的には的確である。なお、上記合力と床反力とは、互いに大きさが同じで向きが逆になっている。

それに対し、図9のように、ロボット1のある運動状態から、ある点Prまわりに上体姿勢角加速度（上体24の姿勢角の角加速度）を摂動  
25 させると、ロボット1の全体重心は摂動せずに、全体重心まわりの角運動量が摂動する。すなわち、点Prまわりの上体姿勢角加速度の摂動は、

床反力鉛直成分と床反力水平成分とを摂動させずに、目標ZMPまわりの床反力モーメント成分（鉛直軸まわり成分を除く）を摂動させる。このようにロボット1の上体姿勢角加速度を摂動させる運動モードを上体回転モードと呼ぶ。

- 5      言いかえると、床反力鉛直成分と床反力水平成分を変化させずに、目標ZMPまわりの床反力モーメント成分（鉛直軸まわり成分を除く）を変化させる運動を上体回転モードと呼ぶ。

この時の単位角加速度当たりの床反力モーメント成分の変化を $\Delta M_r$ 、単位角加速度当たりの床反力水平成分の変化を $\Delta F_r$ とする。 $\Delta F_r$ は  
10    零である。図9に示す状況で上体24が前傾するように上体姿勢角の角加速度を発生させると、 $\Delta M_r$ は図9に示す矢印の向きに作用する。

次に、本実施形態で歩容生成に用いられるロボット動力学モデルについて説明する。本実施形態では単純化された（近似された）以下に示す動力学モデルを用いる。ただし、以下に示す動力学モデルに関しては、  
15    キネマティクスモデル（関節、リンクの構造や寸法を表すモデルであり、言い換えると、関節変位とリンクの位置姿勢との関係を表すモデルである。）も必要である。

図10は、本実施形態に用いられるロボット動力学モデルである。図示の如く、この動力学モデルは、ロボット1の各脚体2にそれぞれ対応  
20    する2つの質点 $2m$ 、 $2m$ 、及び上体24に対応する質点 $24m$ からなる合計3質点と、イナーシャがあつて質量のないフライホイールFHとから構成されるモデルである。この動力学モデルでは、デカップルド、即ち、脚体2、2の動力学（各質点 $2m$ 、 $2m$ の動力学）と上体24の動力学（質点 $24m$ 及びフライホイールFHの動力学）とが相互に非干  
25    渉に構成されると共に、ロボット1全体の動力学は、それらの線形結合で表される。また、さらに、上体24の運動と床反力との関係も、上体

24の並進運動（上体並進モード）と床反力との関係、並びに上体24の回転運動（上体回転モード）と床反力との関係に分離される。具体的には、上体質点24mの水平運動によって発生する床反力は、上体24の水平方向並進運動（上体並進モード）によって発生する床反力に対応し、フライホイールの回転運動によって発生する床反力は、上体24の姿勢角の回転運動（上体回転モード）によって発生する床反力に対応する。

尚、ロボット1の腕体の質量は上体24に含まれるものとし、上体質点24mは腕体の質量を含む質量をもつ。本実施形態では、目標歩容における腕体の運動（腕振り運動）は、後述するように、ロボット1の腕振り以外の運動によってロボット1に発生する鉛直軸まわりの慣性力のモーメントを打ち消しつつも、上体24に対する両腕体の全体の重心の相対位置が動かないように行なわれるので、腕体の腕振り運動による（鉛直軸まわり成分を除く）床反力モーメントへの影響と床反力水平成分への影響とは無視する。

以下に上記単純化モデルを数式化する。ただし、説明を簡単にするために、サジタルプレーン（前後軸（X軸）と鉛直軸（Z軸）を含む平面）での運動方程式のみを記述し、ラテラルプレーン（左右軸（Y軸）と鉛直軸（Z軸）を含む平面）での運動方程式を省略した。

説明の便宜上、動力学モデルに関する変数およびパラメータを以下のように定義する。なお、各質点2m, 2m, 24mはそれに対応する部位の代表点であるか、あるいはその部位の位置姿勢から幾何学的に一義的に決定される点に相当する。例えば、支持脚側脚体2の質点2mの位置は、該脚体2の足平22の底面の前記代表点から所定の距離だけ上方の点とする。

$Z_{sup}$  : 支持脚質点鉛直位置

$Z_{swg}$  : 遊脚質点鉛直位置

$Z_b$  : 上体質点鉛直位置 (上体鉛直位置とは一般的には異なる。)

$Z_{Gtotal}$  : 全体重心鉛直位置

$X_{sup}$  : 支持脚質点水平位置

5  $X_{swg}$  : 遊脚質点水平位置

$X_b$  : 上体質点水平位置 (前記点  $P_r$  から前後にある所定の距離だけオフセットした点である。オフセットは、直立時などにおいて、厳密モデルの重心位置と、本動力学モデルの重心位置がなるべく一致するように、決定される。上体水平位置とは一般的には異なる。)

10  $X_{Gtotal}$  : 全体重心水平位置

$\theta_{by}$  : 鉛直方向に対する Y 軸回りの上体姿勢角 (傾斜角)

$m_b$  : 上体質点質量

$m_{sup}$  : 支持脚質点質量

$m_{swg}$  : 遊脚質点質量

15  $m_{total}$  : ロボット総質量 ( $=m_{total}+m_{sup}+m_{swg}$ )

$J$  : 上体慣性モーメント (上体回転モードにおける等価慣性モーメントである。実ロボット 1 の上体 24 部位の慣性モーメントとは一般的には一致しない。)

$F_x$  : 床反力水平成分 (詳しくは並進床反力の前後方向 (X 軸) 成分)

20  $F_z$  : 床反力鉛直成分 (詳しくは並進床反力の鉛直方向 (Z 軸) 成分。  
本実施形態では、これは目標並進床反力鉛直成分に等しい)

$M_y$  : 目標 ZMP まわりの床反力モーメント (詳しくは床反力モーメントの左右軸 (Y 軸) まわり成分)

尚、本実施形態では、各脚体 2 の質点  $2_m$  の位置と、その脚体 2 の足  
25 平 2 2 の位置 (足平 2 2 のあらかじめ定めた代表点の位置) との位置関係はあらかじめ定められており、一方の位置が決まれば、他方の位置は



一義的に定まるものとされている。また、上体質点 2 4 m と、上体 2 4 の位置（上体 2 4 のあらかじめ定められた代表点の位置）との位置関係は、上体 2 4 の姿勢角に応じてあらかじめ定められており、一方の位置と姿勢角とが決まれば、他方の位置は一義的に定まるものとされている。

5 また、任意の変数  $X$  に対して、 $dX/dt$  は  $X$  の 1 階微分を表わし、 $d^2X/dt^2$  は  $X$  の 2 階微分を表わす。したがって、変数  $X$  が変位ならば、 $dX/dt$  は速度、 $d^2X/dt^2$  は加速度を意味する。 $g$  は重力加速度定数を示す。ここでは、 $g$  は正の値とする。

上記動力学モデルの運動方程式（動力学平衡条件を表す式）は、式  
10 0 1、式 0 2、式 0 3 で表される。

$$F_z = m_b \cdot (g + d^2Z_b/dt^2) + m_{sup} \cdot (g + d^2Z_{sup}/dt^2) + m_{swg} \cdot (g + d^2Z_{swg}/dt^2) \quad \dots\dots \text{式 0 1}$$

$$F_x = m_b \cdot d^2X_b/dt^2 + m_{sup} \cdot d^2X_{sup}/dt^2 + m_{swg} \cdot d^2X_{swg}/dt^2 \quad \dots\dots \text{式 0 2}$$

$$\begin{aligned} M_y = & -m_b \cdot (X_b - X_{zmp}) \cdot (g + d^2Z_b/dt^2) + m_b \cdot (Z_b - Z_{zmp}) \cdot (d^2X_b/dt^2) \\ & - m_{sup} \cdot (X_{sup} - X_{zmp}) \cdot (g + d^2Z_{sup}/dt^2) \\ & + m_{sup} \cdot (Z_{sup} - Z_{zmp}) \cdot (d^2X_{sup}/dt^2) \\ & - m_{swg} \cdot (X_{swg} - X_{zmp}) \cdot (g + d^2Z_{swg}/dt^2) \\ & + m_{swg} \cdot (Z_{swg} - Z_{zmp}) \cdot (d^2X_{swg}/dt^2) + J \cdot d^2\theta_{by}/dt^2 \quad \dots\dots \text{式 0 3} \end{aligned}$$

また、ロボット全体重心位置には次の関係式が成立する。

$$Z_{Gtotal} = (m_b \cdot Z_b + m_{sup} \cdot Z_{sup} + m_{swg} \cdot Z_{swg}) / m_{total} \quad \dots\dots \text{式 0 4}$$

$$X_{Gtotal} = (m_b \cdot X_b + m_{sup} \cdot X_{sup} + m_{swg} \cdot X_{swg}) / m_{total} \quad \dots\dots \text{式 0 5}$$

25 以下に上記動力学モデルと前記  $\Delta F_p$ 、 $\Delta M_p$ 、 $\Delta F_r$ 、 $\Delta M_r$  の関係を示す。

前記  $\Delta F_p$  は、式 0 2 において、 $d^2 X_b/dt^2$  を単位量だけ摂動させたときの  $F_x$  の摂動量であるから、次式によって求められる。

$$\Delta F_p = m b \quad \dots \text{式 0 6}$$

すなわち、上体並進モードの単位加速度当たりの床反力の水平成分の変化  $\Delta F_p$  は、上記動力学モデルの上体質点 2 4 m の質量に相当する。

前記  $\Delta M_p$  は、式 0 3 において、 $d^2 X_b/dt^2$  を単位量だけ摂動させたときの  $M_y$  の摂動量であるから、次式によって求められる。

$$\Delta M_p = m b * (Z_b - Z_{zmp}) \quad \dots \text{式 0 7}$$

すなわち、上体並進モードの単位加速度当たりの床反力モーメント成分の変化  $\Delta M_p$  は、上記動力学モデルの上体質点質量に、上体質点 2 4 m の目標  $ZMP$  からの高さ（鉛直位置）を乗じたものになる。このときの上体質点 2 4 m 及び目標  $ZMP$  の位置と、上体質点 2 4 m の運動との関係は、上体質点 2 4 m を倒立振子質点、目標  $ZMP$  を倒立振子支点に対応づけたときの倒立振子の挙動に相当する。

前記  $\Delta F_r$  は、式 0 2 において、 $d^2 \theta_{by}/dt^2$  を単位量だけ摂動させたときの  $F_x$  の摂動量であるから、次式によって求められる。

$$\Delta F_r = 0 \quad \dots \text{式 0 8}$$

すなわち、上体回転モードの単位加速度当たりの並進床反力水平成分の変化  $\Delta F_r$  は、0 である。

前記  $\Delta M_r$  は、式 0 3 において、 $d^2 \theta_{by}/dt^2$  を単位量だけ摂動させたときの  $M_y$  の摂動量であるから、次式によって求められる。

$$\Delta M_r = J \quad \dots \text{式 0 9}$$

すなわち、上体回転モードの単位加速度当たりの床反力モーメント成分の変化  $\Delta M_r$  は、フライホイールの慣性モーメントに相当する。

本実施形態における歩容生成装置 1 0 0 は、ロボット 1 の片方の脚体 2 が着地してから他方の脚体 2 が着地するまでの 1 歩分の目標歩容を単

位として、その1歩分の目標歩容を順番に生成する。従って、本実施形態で生成する図5の走行歩容では、該目標歩容は片脚支持期の開始時から、これに続く空中期の終了時（次の片脚支持期の開始時）までの目標歩容が順番に生成される。ここで、本明細書では、目標歩容の「1歩」は、ロボット1の片方の脚体2が着地してからもう一方の脚体2が着地するまでの意味で使用する。また、新たに生成しようとしている目標歩容を「今回歩容」、その次の目標歩容を「次回歩容」、さらにその次の目標歩容を「次次回歩容」、というように呼ぶ。また、「今回歩容」の一つ前に生成した目標歩容を「前回歩容」と呼ぶ。

また、歩容生成装置100が今回歩容を新たに生成するとき、該歩容生成装置100には、ロボット1の2歩先までの遊脚側足平22の着地予 positioning 姿勢、着地予定時刻の要求値（要求）が歩容に対する要求パラメータとして入力される（あるいは歩容生成装置100が記憶装置から要求パラメータを読み込む）。そして、歩容生成装置100は、これらの要求パラメータを用いて、目標上体位置姿勢軌道、目標足平位置姿勢軌道、目標ZMP軌道、目標床反力鉛直成分軌道、目標腕姿勢軌道等を生成する。このとき、これらの軌道を規定する歩容パラメータの一部は、歩行の継続性を確保するように適宜修正される。

以下に図5の走行歩容を生成することを主要例にして、歩容生成装置100の歩容生成処理の詳細を図12～図41を参照しつつ説明する。図12は、その歩容生成装置100が実行する歩容生成処理を示すフローチャート（構造化フローチャート）である。

まずS010において時刻tを0に初期化するなど種々の初期化作業が行なわれる。この処理は、歩容生成装置100の起動時等に行なわれる。次いで、S012を経てS014に進み、歩容生成装置100は、制御周期（図12のフローチャートの演算処理周期）毎のタイマ割り込

みを待つ。制御周期は $\Delta t$ である。

次いで、S 0 1 6に進み、歩容の切り替わり目であるか否かが判断され、歩容の切り替わり目であるときはS 0 1 8に進むと共に、切り替わり目でないときはS 0 3 0に進む。ここで、上記「歩容の切り替わり目」は、前回歩容の生成が完了し、今回歩容の生成を開始するタイミングを意味し、例えば前回歩容の生成を完了した制御周期の次の制御周期が歩容の切り替わり目になる。

S 0 1 8に進むときは時刻 $t$ が0に初期化され、次いでS 0 2 0に進み、次回歩容支持脚座標系、次次回歩容支持脚座標系、今回歩容周期および次回歩容周期が読み込まれる。これらの支持脚座標系及び歩容周期は、前記要求パラメータにより定まるものである。すなわち、本実施形態では、歩容生成装置100にジョイスティック等から与えられる要求パラメータは、2歩先までの遊脚側足平22の着地予定位置姿勢（足平22が着地してから足底を床面にほぼ全面的に接触させるように、滑らずに回転させた状態での足平位置姿勢）、着地予定時刻の要求値を含んでおり、その1歩目の要求値、2歩目の要求値がそれぞれ、今回歩容、次回歩容に対応するものとして、今回歩容の生成開始時（前記S 0 1 6の歩容の切り替わり目）以前に歩容生成装置100に与えられたものである。なお、これらの要求値は今回歩容の生成途中でも変更することは可能である。

そして、上記要求パラメータにおける1歩目の遊脚側足平22（今回歩容での遊脚側足平22）の着地予定位置姿勢の要求値に対応して次回歩容支持脚座標系が定まる。

例えば図15を参照して、今回歩容（1歩目）に係わる遊脚側足平22（図では22L）の着地予定位置姿勢の要求値が、今回歩容の支持脚側足平22（図では22R）の着地位置姿勢に対して、今回歩容支持脚

座標系のX軸方向（今回歩容の支持脚側足平22Rの前後方向）及びY軸方向（今回歩容の支持脚側足平22Rの左右方向）に、それぞれ  $x_{next}$ 、 $y_{next}$  だけ移動し、且つZ軸回り（鉛直軸回り）に  $\theta_{znext}$  だけ回転させた位置姿勢であるとする。ここで、支持脚座標系は、支持脚側足平22を水平姿勢（より一般的には床面に平行な姿勢）にして該支持脚側足平22の底面のほぼ全面を床面に接触（密着）させた状態において、該支持脚側脚体2の足首中心から床面に延ばした垂線が該床面と交わる点（この点は、本実施形態の例では支持脚側足平22の底面のほぼ全面を床面に接触させた状態では、該足平22の代表点と合致する）を原点とし、その原点を通る水平面をXY平面とする、床に固定された座標系である。この場合、X軸方向、Y軸方向は、それぞれ支持脚側足平22の前後方向、左右方向である。尚、支持脚座標系の原点は、必ずしも支持脚側足平22の底面のほぼ全面を床面に接触させた状態での該足平22の代表点（足平22の位置を代表する点）に合致する必要はなく、該代表点と異なる床面上の点に設定されてもよい。

このとき、次回歩容支持脚座標系は、図示のように今回歩容の遊脚側足平22Lの着地予定位置姿勢の要求値に従って該足平22を着地させた場合（足平22の代表点を着地予定位置の要求値に一致させ、且つ、足平22の姿勢（向き）を着地予定姿勢の要求値に一致させた場合）における該足平22Lの代表点（より詳しくは該代表点に合致する床上の点）を原点とし、該原点を通る水平面内における該足平22Lの前後方向、左右方向をそれぞれX'軸方向、Y'軸方向とする座標系である。

上記と同様に、2歩目の遊脚側足平22の着地予定位置姿勢の要求値に応じて次々回歩容支持脚座標系（図15のX''Y''座標を参照）が定まる。また、今回歩容周期は、今回歩容の支持脚側足平22の着地予定時刻（要求値）から、1歩目（今回歩容）の遊脚側足平22の着地予定

時刻（要求値）までの時間として定まり、次回歩容周期は、1歩目の遊脚側足平22の着地予定時刻（要求値）から2歩目の遊脚側足平22の着地予定時刻（要求値）までの時間として定まる。

尚、前記要求パラメータは、本実施形態ではジョイスティックの所要  
5 の操作によって歩容生成装置100に入力されるものとしたが、あらかじめ該要求パラメータあるいはこれに対応する上記の支持脚座標系の位置姿勢及び歩容周期をロボット1の移動スケジュールとして記憶しておいても良い。あるいは、ジョイスティックなどの操縦装置からの指令  
10 （要求）とそのときまでのロボット1の移動履歴とを基に前記次回及び次次回歩容支持脚座標系、並びに今回及び次回歩容周期を決定しても良い。

次いでS022に進み、歩容生成装置100は、今回歩容に続く仮想的な周期的歩容としての定常旋回歩容の歩容パラメータを決定する。該歩容パラメータは、定常旋回歩容における目標足平位置姿勢軌道を規定  
15 する足平軌道パラメータ、基準とする上体姿勢軌道を規定する基準上体姿勢軌道パラメータ、目標腕姿勢軌道を規定する腕軌道パラメータ、目標ZMP軌道を規定するZMP軌道パラメータ、目標床反力鉛直成分軌道を規定する床反力鉛直成分軌道パラメータを含む。さらに、目標床反力水平成分許容範囲を規定するパラメータも歩容パラメータに含まれる。

20 尚、この明細書で「定常旋回歩容」は、その歩容を繰り返したときに歩容の境界（本実施形態では1歩毎の歩容の境界）においてロボット1の運動状態（足平位置姿勢、上体位置姿勢等の状態）に不連続が生じないような周期的歩容を意味するものとして使用する。以降、「定常旋回歩容」を「定常歩容」と略する場合もある。

25 周期的歩容である定常旋回歩容は、本実施形態では、ロボット1の2歩分の歩容、すなわち今回歩容に続く第1旋回歩容と該第1旋回歩容に

続く第2旋回歩容とからなる歩容を該定常旋回歩容の1周期分の歩容として、その1周期分の歩容を繰り返す歩容である。尚、ここで「旋回」なる用語を用いたのは、旋回率を零とするときは直進を意味するので、直進も広義の意味で旋回に含ませることができるからである。また、生成する目標歩容が前記図5の走行歩容であると、その目標歩容の今回歩容は、片脚支持期及び空中期を有する走行歩容であるので、定常旋回歩容の第1旋回歩容及び第2旋回歩容は、いずれも今回歩容と同様に片脚支持期と空中期とを有する歩容である。つまり、第1旋回歩容及び第2旋回歩容の基本的な歩容形態は今回歩容と同一である。

- 10 定常旋回歩容について補足すると、2足移動ロボットでは、定常旋回歩容の1周期分は、前記した狭義の意味での歩容が、少なくとも2歩分、必要である。そして、3歩以上の歩容を1周期分の歩容とする複雑な定常旋回歩容を設定することも可能である。但し、定常旋回歩容は、後述の如く、今回歩容の終端（終了時刻）における発散成分（詳細は後述する）を決定するためだけに用いられる。このため、3歩以上の歩容を1周期とする定常旋回歩容を用いることは、歩容生成の処理が煩雑となるにも関わらず、効果は少ない。そこで、本実施形態での定常旋回歩容の1周期分の歩容を2歩分の歩容（第1及び第2旋回歩容）により構成するようにしている。尚、3足以上の脚式移動ロボットにあっては、それ
- 15 に応じて定常旋回歩容を定義するに足る歩容数が増加する。以下では、説明の便宜上、複数の狭義の歩容（本実施形態では2歩分の歩容）から成る定常旋回歩容を1歩の歩容とみなす。

- 25 定常旋回歩容は、歩容生成装置100で今回歩容の終端における発散成分や上体鉛直位置速度、上体姿勢角及びその角速度等のロボット1の運動状態を決定するために暫定的に作成されるものであり、歩容生成装置100からそのまま出力されるものではない。

尚、「発散」とは、図13に示すように、2足移動ロボット1の上体24の位置が両足平22, 22の位置からかけ離れた位置にずれてしまうことを意味する。発散成分の値とは、2足移動ロボット1の上体24の位置が両足平22, 22の位置（より具体的には、支持脚側足平22の接地面に設定されたグローバル座標系（支持脚座標系）の原点）からかけ離れていく具合を表す数値である。

本実施形態では、目標歩容が、前記発散を生じることなく、継続的に生成されるように、発散成分を指標にして歩容を生成するようにした。ただし、継続的な歩容の代表例である定常歩容（歩容の軌道の不連続を発生することなく、同じパターンの歩容を繰り返すことができる周期的歩容であり、原理上、無限回繰り返しても発散しない歩容）の初期発散成分（定常歩容の初期時刻での発散成分）であっても、単純に0ではなく、定常歩容のパラメータが変われば、その初期発散成分も変わる。すなわち、歩き方あるいは走り方等の歩容形態によって、適切な発散成分が変わる。そこで、本実施形態では、これから生成しようとする今回歩容の後に続く定常歩容が前記今回歩容に係わる要求パラメータに応じて設定され、定常歩容の初期発散成分を求めてから、今回歩容の終端発散成分を定常歩容の初期発散成分に一致させる（より一般的には、今回歩容を定常歩容に連続させもしくは近づける）ように、今回歩容を生成する。このような歩容生成の基本的な指針は本出願人が先に提案した特願2000-352011号のものと同様である。

本発明の実施形態では、特願2000-352011号の第1実施形態で用いたような線形な3質点動力学モデルを用いていないが、次式で定義される発散成分および収束成分の概念は、図10に示したモデルのような非線形な動力学モデルの挙動の摂動分に対しても、近似的に十分な精度で適用することができる。



## 5.1

$$\text{発散成分} = \text{上体質点水平位置} + \text{上体質点水平速度} / \omega 0$$

…式 1 0

$$\text{収束成分} = \text{上体質点水平位置} - \text{上体質点水平速度} / \omega 0$$

…式 1 1

5

ただし、ここでの上体質点水平位置は、図 1 0 に示す前記動力学モデルにおいては、上体質点水平位置  $Xb$  を表す。

また、 $\omega 0$  はある所定の値であり、走行時では、特願 2 0 0 0 - 3 5 2 0 1 1 号の歩行歩容生成時の値に対して若干変更する必要がある。

10 発散成分および収束成分に関するその他の詳細は、特願 2 0 0 0 - 3 5 2 0 1 1 号に記述されているので、ここではこれ以上言及しない。

本実施形態においては、特願 2 0 0 0 - 3 5 2 0 1 1 号に示した方式に加え、さらに、後述するように、目標床反力鉛直成分軌道を規定する歩容パラメータを設定し、この目標床反力鉛直成分を動力学的に満足する

15 るようにロボット 1 の全体重心鉛直位置を決定する。この場合、床反力鉛直成分の 2 階積分値がロボット 1 の全体重心鉛直位置を規定するものになるので、目標床反力鉛直成分の設定が悪いと、ロボット 1 の全体重心鉛直位置もしくは上体鉛直位置が高くなり過ぎたり低くなり過ぎたりする。したがって、目標床反力鉛直成分の設定方法も重要な課題である。

20 しかし、床反力鉛直成分と上体鉛直位置との関係は、ZMP と上体水平位置との関係に似ているので、上体水平位置速度を適切にするための目標 ZMP 決定手法の一部を、以下の本実施形態に示すように、少し変更するだけで、上体鉛直位置速度を適切にするための目標床反力鉛直成分の決定手法に適用することができる。

25 本題に戻り、S 0 2 2 では、図 1 4 に示すフローチャートに従って、以下の処理が行われる。

まず、S100において、今回歩容、第1旋回歩容、第2旋回歩容の順に足平位置姿勢軌道がつながるように、定常歩容の歩容パラメータのうちの足平軌道パラメータが決定される。以下に具体的な設定方法を図15を参照して説明する。尚、以降の説明では、支持脚側の脚体2の足平22を支持脚足平と称し、遊脚側の脚体2の足平2を遊脚足平を称する。また、歩容の「初期」、「終端」はそれぞれ歩容の開始時刻、終了時刻もしくはそれらの時刻における瞬時歩容を意味する。

足平軌道パラメータは、第1旋回歩容および第2旋回歩容の初期及び終端のそれぞれにおける支持脚足平22及び遊脚足平22のそれぞれの位置姿勢、各旋回歩容の歩容周期等から構成される。この足平軌道パラメータのうち、第1旋回歩容初期遊脚足平位置姿勢は、次回歩容支持脚座標系から見た今回歩容終端支持脚足平位置姿勢とされる。この場合、走行歩容では、今回歩容終端における支持脚足平22は、空中に移動している。そして、今回歩容終端支持脚足平位置姿勢は、今回歩容初期支持脚足平位置姿勢（＝前回歩容終端遊脚足平位置姿勢）から、前記要求パラメータにおける2歩目の遊脚足平22の着地予定位置姿勢の要求値（今回歩容の支持脚足平22の次回歩容における着地予定位置姿勢の要求値）もしくは該要求値に対応する次次回歩容支持脚座標系に応じて定まる次回歩容終端遊脚足平位置姿勢に至る足平位置姿勢軌道（詳しくは次回歩容支持脚座標系から見た軌道）を、今回歩容終端まで前記有限時間整定フィルタを用いて生成することにより求められる。

尚、次回歩容終端遊脚足平位置姿勢は、その位置姿勢から足平22を接地させたまま、つま先を下げるように該足平22を水平姿勢までピッチ方向に所定角度回転させたときの該足平の位置姿勢が次次回歩容支持脚座標系の位置姿勢に合致するように決定される。換言すれば、次回歩容終端遊脚足平位置姿勢は、前記要求パラメータにおける2歩目の遊脚

足平 2 2 の着地位置姿勢の要求値から、該足平 2 2 をすべらないように接地させたまま、つま先を持ち上げるように該足平 2 2 をピッチ方向に所定角度回転させた状態（つま先を上げてかかとを接地させた状態）での該足平 2 2 の位置姿勢である。

- 5      また、第 1 旋回歩容初期支持脚足平位置姿勢は、次回歩容支持脚座標系から見た今回歩容終端遊脚足平位置姿勢とされる。この場合、今回歩容終端遊脚足平位置姿勢は、前記次回歩容終端遊脚足平位置姿勢の場合と同様、前記次回歩容支持脚座標系もしくはこれに対応する前記要求パラメータの 1 歩目（今回歩容）の遊脚着地予 positioning 姿勢の要求値に応じて定まるものである。すなわち、該今回歩容終端遊脚足平位置姿勢は、
- 10      その位置姿勢から、足平 2 2 を接地させたまま、つま先を下げるように該足平 2 2 を回転させて該足平 2 2 の底面のほぼ全面を床面に接地させたときの該足平の代表点が次回歩容支持脚座標系の原点に合致するように決定される。
- 15      第 1 旋回歩容終端遊脚足平位置姿勢は、今回歩容終端遊脚足平位置姿勢や次回歩容終端遊脚足平位置姿勢の決定手法と同様に、次回歩容支持脚座標系から見た次次回歩容支持脚座標系の位置姿勢に基づいて決定される。より具体的には、第 1 旋回歩容終端遊脚足平位置姿勢は、その位置姿勢から足平 2 2 を接地させたまま、すべらないように該足平 2 2 を
- 20      水平姿勢まで所定角度回転させたときの足平位置姿勢が、次回歩容支持脚座標系から見た次次回歩容支持脚座標系の位置姿勢に合致するように設定される。

- 第 1 旋回歩容終端では、支持脚足平 2 2 は離床して空中にある。支持脚足平 2 2 が離床してから後の軌道を決定するために、第 1 旋回歩容支持脚足平着地予 positioning 姿勢が設定される。第 1 旋回歩容支持脚足平着地予 positioning 姿勢は、次回歩容支持脚座標系から見た次次回歩容支持脚座
- 25

標系の位置姿勢に基づいて設定される。より具体的には、第1旋回歩容支持脚足平着地予定位置姿勢は、次回歩容支持脚座標系から見た次次回歩容支持脚座標系の位置姿勢である。なお、次次回歩容支持脚座標系は、次次回歩容支持脚座標系と次次回歩容支持脚座標系との相対的位置姿勢関係が、今回歩容支持脚座標系と次回歩容支持脚座標系との相対的位置姿勢関係と一致するように設定される。

第1旋回歩容終端支持脚足平位置姿勢は、第1旋回歩容初期支持脚足平位置姿勢を求めた場合と同様に、第1旋回歩容初期支持脚足平位置姿勢から、前記第1旋回歩容支持脚足平着地予定位置姿勢に至る足平位置姿勢軌道（より詳しくは次回歩容支持脚座標系から見た軌道）を、第1旋回歩容終端まで前記有限時間整定フィルタを用いて生成することにより求められる。

第2旋回歩容初期遊脚足平位置姿勢は、次次回歩容支持脚座標系から見た第1旋回歩容終端支持脚足平位置姿勢とされる。第2旋回歩容初期支持脚足平位置姿勢は、次次回歩容支持脚座標系から見た第1旋回歩容終端遊脚足平位置姿勢とされる。

第2旋回歩容終端遊脚足平位置姿勢は、今回歩容支持脚座標系から見た今回歩容終端遊脚足平位置姿勢とされる。第2旋回歩容終端支持脚足平位置姿勢は、今回歩容支持脚座標系から見た今回歩容終端支持脚足平位置姿勢とされる。

第1旋回歩容および第2旋回歩容の歩容周期は、次回歩容周期と同一に設定される。これらの第1旋回歩容及び第2旋回歩容の歩容周期は、互いに同一にすることは必ずしも必要ではないが、いずれの周期も、少なくとも次回歩容周期に応じて決定するのが好ましい。尚、今回歩容、第1旋回歩容および第2旋回歩容の上記以外の運動パラメータ（両脚支持期時間などの時間パラメータを含む）は、上記決定されたパラメータ

に応じて、歩容の条件（アクチュエータの速度が許容範囲に入っているか、可動角を超えていないか、床などと干渉していないかなど）を満足するように適宜決定する。

次に、S 1 0 2に進み、目標上体姿勢が追従すべき基準上体姿勢軌道を規定する基準上体姿勢軌道パラメータが決定される。基準上体姿勢は、定常歩容の初期（第1旋回歩容の初期）と終端（第2旋回歩容の終端）とでつながるように（定常歩容の初期、終端での基準上体姿勢の姿勢角及びその角速度が一致するように）に設定されている限り、一定姿勢である必要はないが、本実施形態では理解を容易にするため、基準上体姿勢は、直立姿勢（鉛直姿勢）に設定される。つまり、本実施形態では、基準上体姿勢は、定常歩容の全期間において直立姿勢に設定される。従って、本実施形態では、基準上体姿勢の姿勢角の角速度及び角加速度は0である。

次に、S 1 0 4に進み、腕姿勢軌道パラメータ、より詳しくは鉛直軸（あるいは上体体幹軸）まわりの両腕体の角運動量変化に関すること以外の腕姿勢軌道パラメータが決定される。たとえば、上体24に対する腕体の手先の相対高さや腕全体の相対重心位置などの腕姿勢軌道パラメータが決定される。尚、本実施形態では、腕全体の相対重心位置は、上体に対して一定に維持されるように設定される。

次に、S 1 0 6に進み、床反力鉛直成分軌道パラメータが設定される。この場合、該パラメータにより規定される床反力鉛直成分軌道が、第1旋回歩容および第2旋回歩容のいずれにおいても図6のように実質的に連続なものとなるように床反力鉛直成分軌道パラメータが設定される。すなわち、定常旋回歩容の目標床反力鉛直成分軌道は図16のようなパターンで設定される。そのパターンでは、第1旋回歩容及び第2旋回歩容のいずれにおいても、片脚支持期では床反力鉛直成分が台形状に変化

し、空中期では床反力鉛直成分が0に維持される。そして、このパターンの折れ点の時刻や、台形部分の高さ（ピーク値）が床反力鉛直成分軌道パラメータとして設定される。

この床反力鉛直成分軌道パラメータの設定に際しては、床反力鉛直成分の歩容全期間（第1旋回歩容と第2旋回歩容両方の期間を合わせた期間で定常歩容の1周期の期間）における平均値をロボット1の自重と一致させる。すなわち、床反力鉛直成分の平均値がロボット1に作用する重力と同じ大きさで反対向きになるようにする。

上記のごとく床反力鉛直成分軌道を設定することは、定常歩容の条件を満たすために必要である。定常歩容の条件とは、支持脚座標系（支持脚側足平22の接地面に設定された座標系）から見た歩容のあらゆる状態変数（ロボット1の各部の位置、姿勢、速度等）の初期状態（第1旋回歩容の初期状態）と次の支持脚座標系（次の第1旋回歩容の支持脚座標系）から見た歩容の終端状態（第2旋回歩容の終端状態）が一致していることである（以下、この条件を定常歩容の境界条件ということがある）。したがって、定常歩容終端におけるロボット1の全体重心鉛直速度と定常歩容初期における全体重心鉛直速度との差（詳細には、第2旋回歩容終端の全体重心鉛直速度と第1旋回歩容初期の全体重心鉛直速度との差）も零でなければならない。上記差は床反力鉛直成分と重力との差の積分値（1階積分値）であるから、上記差を零にするためには、上記のごとく床反力鉛直成分軌道を設定する必要がある。

尚、本実施形態では、床反力鉛直成分の第1旋回歩容、第2旋回歩容それぞれの期間における平均値をロボット1の自重と一致させるようにした。より具体的には、例えば第1旋回歩容及び第2旋回歩容の歩容周期に応じて各旋回歩容における床反力鉛直成分軌道の台形部分の折れ点の時刻を設定した上で、その台形部分の高さを、床反力鉛直成分の第1

旋回歩容、第2旋回歩容それぞれの期間における平均値がロボット1の自重と一致するように決定した（台形の高さを未知数として、上記平均値及び自重の一致条件を表す方程式を解くことで台形の高さを求める）。

こうすることにより、第1旋回歩容終端の全体重心鉛直速度と第1旋回歩容初期の全体重心鉛直速度との差も0、第2旋回歩容終端の全体重心鉛直速度と第2旋回歩容初期の全体重心鉛直速度との差も0になる。ただし、このようにする必然性はない。例えば、第1旋回歩容と第2旋回歩容との境界あたりで上体鉛直位置が高くなり過ぎたり低くなり過ぎたりして無理な姿勢になりそうな場合には、各旋回歩容で上記平均値及び自重を一致させた状態から各旋回歩容の床反力鉛直成分軌道の台形の高さ等を修正するようにしてもよい。

次に、S108に進み、上記のごとく図16のように設定された床反力鉛直成分軌道に応じて、床反力水平成分の許容範囲[Fxmin, Fxmax]（より詳しくはこれを規定するパラメータ）が図17のように設定される。図17の負側の折れ線が床反力水平成分許容下限値 Fxmin、正側の折れ線が床反力水平成分許容上限値 Fxmax を表す。これらの設定方法に関して以下に補足する。以下では、床面が水平である場合について説明する。

床反力水平成分は、床と足平22との間の摩擦によって発生するが、摩擦はいくらでも発生できるわけではなく、限界がある。したがって、生成された目標歩容に従って実際のロボット1が移動した時にスリップしないようにするためには、目標歩容の床反力水平成分が、常に摩擦限界以内にななければならない。そこで、この条件を満足させるために、床反力水平成分許容範囲を設定し、後述するように、目標歩容の床反力水平成分がこの許容範囲内になるように、目標歩容を生成することとした。

床と足平22との間の摩擦係数を $\mu$ とすると、Fxmin は、常に $-\mu *$

床反力鉛直成分以上に、 $F_{x\max}$  は  $\mu$  \* 床反力鉛直成分以下に設定されなければならない。最も単純な設定方法は、次式による設定である。ただし、 $k_a$  は 1 より小さい正の定数である。

$$F_{x\min} = -k_a * \mu * \text{床反力鉛直成分}$$

$$5 \quad F_{x\max} = k_a * \mu * \text{床反力鉛直成分}$$

…式 1 2

図 1 7 の床反力水平成分許容範囲は、式 1 2 にしたがって設定した例である。床反力水平成分許容範囲を規定するパラメータとして、図 1 7 の台形波形などの折れ点での値と時刻を設定してもよいが、式 1 2 により床反力水平成分許容範囲を決定するときには、単に式 1 2 における  $(k_a * \mu)$  の値をパラメータとして設定するだけでも良い。

尚、上記条件（目標歩容の床反力水平成分を常に摩擦限界以内にするという条件）を満足しているならば、他の設定方法で床反力水平成分許容範囲を設定するようにしても構わない。また、S 1 0 8 で設定する床反力水平成分許容範囲は、今回歩容の終端条件を決定するための定常歩容を生成するために用いるものであるため、必ずしも厳密な摩擦限界に基づいて決定する必要はない。例えば片脚支持期の床反力水平成分許容範囲を摩擦限界を越えるような範囲に設定してもよい。このことは空中期でも同様である。

次に、S 1 1 0 に進み、第 1 旋回歩容および第 2 旋回歩容を合わせた定常歩容の Z M P 軌道を規定する Z M P 軌道パラメータが設定される。この場合、目標 Z M P 軌道は、前述したように安定余裕が高くかつ急激な変化をしないように設定される。

さらに詳細には、図 5 の走行歩容においては、支持脚足平 2 2 のかかとで着地した後、しばらくして該支持脚足平 2 2 の底面のほぼ全面が接地し、さらにしばらくして、支持脚足平 2 2 のつま先だけが接地する。



そして、次に支持脚足平 2 2 のつま先で蹴って空中に飛び上がり、最後に遊脚足平 2 2 のかかとで着地する。また、目標 ZMP は接地面内に存在しなければならない。そこで、本実施形態では、定常歩容の第 1 旋回歩容及び第 2 旋回歩容のそれぞれの目標 ZMP の X 軸方向の位置は、前記図 7 の上段図に示したように、支持脚足平 2 2 のかかとを初期位置として、該足平 2 2 の底面のほぼ全体が接地するまでその位置に留まるように設定される。次に、目標 ZMP は支持脚足平 2 2 の中央に移動し、該足平 2 2 がつま先接地状態になるまでにつま先に移動し、その後、離床時まで支持脚足平 2 2 のつまさきに留まるように設定される。さらにその後は、目標 ZMP は、前述のごとく、次の遊脚足平 2 2 の着地までに目標 ZMP が、支持脚足平 2 2 のつまさきから遊脚足平 2 2 のかかとの着地位置まで連続的に移動するように設定される。したがって、第 1 旋回歩容と第 2 旋回歩容とから成る定常歩容の目標 ZMP 軌道（X 軸方向の軌道）は、図 1 8 のようになる。そして、この目標 ZMP 軌道の折れ点の時刻及び位置が ZMP 軌道パラメータとして設定される。この場合、折れ点の時刻は、前記要求パラメータに応じて定めた第 1 旋回歩容及び第 2 旋回歩容の歩容周期に応じて設定され、該折れ点の位置は、次回歩容支持脚座標系及び次次回歩容支持脚座標系の位置姿勢あるいはこれらの座標系を規定する要求パラメータの 1 歩目及び 2 歩目の遊脚側足平着地予 positioning 姿勢の要求値に応じて設定される。尚、ZMP 軌道の Y 軸方向の位置は、前記図 7 の下段図に示したものと同様に設定される。より詳しくは、第 1 旋回歩容における目標 ZMP の Y 軸方向位置の軌道は、図 7 の下段図のものと同一パターンで設定され、第 2 旋回歩容における目標 ZMP の Y 軸方向位置の軌道は、第 1 旋回歩容のものと同一形の軌道で、該軌道の終端につながるものに設定される。

最後に、S 1 1 2 に進み、定常歩容 1 歩（1 周期）の初期時刻、終端

時刻、期間が以下のように再定義される。

定常歩容は、その初期と終端での状態変数が連続的につながる歩容でなければならない。このような歩容の決定を容易にするために、本実施形態では、定常歩容を決定するまでは、前述の狭義の歩容の定義とは異なり、定常歩容の1歩の初期、終端、期間を便宜上、図16のように定める。すなわち、第1旋回歩容の片脚支持期の後半において床反力鉛直成分がある程度減少した時刻を定常歩容の初期時刻  $T_s$  として設定する。なお、初期時刻  $T_s$  は、図7に示すように、支持脚足平22の底面のほぼ全面が接地した状態からつま先接地に変わる瞬間あるいはその直前の時刻（図7の足底全面接地期間の終了時刻もしくはその直前の時刻）に設定するのが望ましい。また、S110において設定した図18（または図7）に示す目標ZMPと時刻  $T_s$  との関係を説明すると、第1旋回歩容において支持脚足平22の底面のほぼ全面が接地した後に、目標ZMPが支持脚足平22の中央に移動し、つま先接地状態になるまでにつま先に移動を完了した瞬間が、時刻  $T_s$  となっているのが望ましい。このような初期時刻  $T_s$  は例えば先に設定した目標ZMP軌道パラメータに応じて設定される。上記のごとく初期時刻  $T_s$  を設定する理由は後述する。

また、図16に示すように、定常歩容の周期  $T_{cyc}$  は第1旋回歩容と第2旋回歩容の歩容周期の和である。定常歩容の終端時刻を  $T_e$  とする。 $T_e$  は、 $T_s$  に  $T_{cyc}$  を加えた時刻に設定される。

定常歩容が決定された時点（後述の図19のS204のループを抜けた時点）から、改めて、歩容の初期、終端等の定義を、前述の狭義の歩容の定義に戻すこととする。以下の説明では、前述の狭義の歩容の定義による初期時刻（支持脚足平22の着地当初の時刻）を0とし、定常歩容を決定するまで用いる上記初期時刻  $T_s$  を参照符号  $T_s$  を用いて（単

に「 $T_s$ 」と省略することもある）本来の初期時刻 0 と区別する。

図 12 の S 0 1 0 から S 0 2 2 までに示す処理が行われた後、S 0 2 4 に進み、定常歩容の初期状態が算出される。ここで算出される初期状態は、定常歩容の初期上体水平位置速度（水平方向での初期上体位置及び初期上体速度）、初期上体鉛直位置速度（鉛直方向での初期上体位置及び初期上体速度）、初期発散成分、初期上体姿勢角およびその角速度である。この初期状態の算出は、図 19 のフローチャートに従って、探索的に行なわれる。

図 19 フローチャートにおいては、先ず、S 2 0 0 において、定常歩容の歩容パラメータ（前記図 12 の S 0 2 2 で設定したパラメータ）に基づいて、目標足平位置姿勢、目標腕姿勢、および目標上体姿勢角（姿勢角と方向）の初期状態（初期時刻  $T_s$  での状態）が決定される。ここで状態とは、位置や姿勢角とその変化率（時間微分）とを表す。

この場合、支持脚側の目標足平位置姿勢の初期状態は、前記図 14 の S 1 0 0 で決定した足平軌道パラメータの第 1 巡回歩容初期支持脚足平位置姿勢から、第 2 巡回歩容終端遊脚足平位置姿勢に至る足平位置姿勢軌道（次回歩容支持脚座標系から見た軌道）を時刻  $T_s$  まで有限時間整定フィルタにより生成することにより決定される。遊脚側の目標足平位置姿勢の初期状態は、次回歩容支持脚座標系から見た今回歩容初期支持脚足平位置姿勢から、第 1 巡回歩容終端遊脚足平位置姿勢に至る足平位置姿勢軌道を時刻  $T_s$  まで有限時間整定フィルタにより生成することにより決定される。また、目標腕姿勢の初期状態は、図 14 の S 1 0 4 で決定した腕姿勢軌道パラメータに基づいて時刻  $T_s$  における腕姿勢（上体 24 に対する両腕体の全体重心位置等）を求めることで決定される。

また、目標上体姿勢角の初期状態は、図 14 の S 1 0 2 で決定した基準上体姿勢軌道パラメータにより定まる時刻  $T_s$  における基準上体姿勢

(姿勢角) 及びその角速度が該目標上体姿勢角の初期状態として決定される。なお、本実施形態では、基準状態姿勢角は鉛直姿勢であるので、目標上体姿勢角の初期状態 (姿勢角及びその角速度) は 0 である。また、本実施形態では、定常歩容の目標足平位置姿勢軌道、床反力鉛直成分軌道、及び目標 ZMP 軌道は、それぞれ、図 14 のフローチャートで決定した足平軌道パラメータ、床反力鉛直成分軌道パラメータ、ZMP 軌道パラメータにより互いに独立的に決定される。例えば定常歩容の瞬時瞬時の目標足平位置姿勢は、床反力鉛直成分の瞬時値に依存することなく足平軌道パラメータに応じて決定される。

- 10 次いで S 2 0 2 において初期上体水平位置速度の候補 (すなわち初期時刻  $T_s$  での上体水平位置速度候補) である ( $X_s$ ,  $V_{xs}$ ) ( $X_s$ : 水平位置、 $V_{xs}$ : 水平速度) が仮決めされる。ここで仮決めする候補 ( $X_s$ ,  $V_{xs}$ ) は、任意でよいが、例えば前回歩容の生成時に求めた定常歩容の初期状態における上体水平位置速度を仮決め候補 ( $X_s$ ,  $V_{xs}$ ) とすればよい。

- 尚、説明を簡略にするため、サジタルプレーン上で X 方向 (前後方向) での定常歩容の初期状態を探索する場合を例にとるが、実際には位置・速度とも X 方向 (前後方向)、Y 方向 (左右方向) を別々にあるいは同時に定常歩容の初期状態 (定常歩容の前記境界条件を満たす初期状態) を探索する必要がある。

探索的な決定手法としては、擬似ヤコビアン (感度マトリックス) を求め、最急降下法などにより次候補を決定する方法や、シンプレックス法などを用いれば良い。本実施例では、最急降下法を用いる。

- 25 次いで、S 2 0 4 を経て S 2 0 6 において、初期 (時刻  $T_s$ ) 上体鉛直位置速度 ( $Z_s$ ,  $V_{zs}$ ) ( $Z_s$ : 鉛直位置、 $V_{zs}$ : 鉛直速度) が決定される。

初期上体鉛直速度  $V_{zs}$  は、本実施形態では以下のように解析的に決定される。

ロボット 1 には、動力学的関係として、次式が成立する。

$$\begin{aligned} & 5 \quad \text{終端全体重心鉛直位置} - \text{初期全体重心鉛直位置} \\ & = (\text{床反力鉛直成分} / \text{ロボットの全体質量}) \text{の 2 階積分} \\ & + \text{重力加速度の 2 階積分} \\ & + \text{初期全体重心鉛直速度} * 1 \text{ 歩の時間} \end{aligned}$$

…式 13

10 (ただし、重力加速度は負の値とする。)

また、定常歩容では、終端全体重心鉛直位置と初期全体重心鉛直位置は一致するので、上式 13 の右辺は零にならなければならない。したがって、これらの関係から初期全体重心鉛直速度を求めることができる。

15 具体的には、まず、前記図 14 の S104 で設定した床反力鉛直成分パラメータによって算出される床反力鉛直成分をロボット 1 の全体質量で割った値を 1 歩の期間（時刻  $T_s$  から時刻  $T_e$  まで）2 階積分することにより、床反力鉛直成分による全体重心移動量（式 13 の右辺第 1 項）が求められる。さらに、重力加速度を 1 歩の期間 2 階積分することにより、重力による全体重心移動量（式 13 の右辺第 2 項）が求められる。

20 そして、上記求めた床反力による全体重心移動量と重力による全体重心移動量との和を符号反転し、これを 1 歩の時間（定常歩容の 1 周期  $T_{cycl}$  の時間）で割ることにより、初期全体重心鉛直速度が求められる。

次に、初期上体鉛直位置  $Z_s$  を求めるために、次式を用いて、時刻 0

25 の全体重心鉛直速度が求められる。この際、次式における時刻  $T_s$  の全体重心鉛直速度には、式 13 に基づいて上記の通り求めた値を代入し、

積分期間は時刻 0 から時刻  $T_s$  までとする。

時刻  $T_s$  の全体重心鉛直速度－時刻 0 の全体重心鉛直速度  
＝（床反力鉛直成分／ロボットの全体質量）の 1 階積分

5    + 重力加速度の 1 階積分

…式 14

（ただし、重力加速度は負の値とする。）

次に、本出願人が先に特開平 10－86080 号公報で提案した上体  
10 高さ決定手法を用いて時刻 0 における（すなわち着地瞬間における）上  
体高さ（上体鉛直位置）が決定される。このとき、時刻 0 における足平  
位置姿勢（前記図 14 の S100 で決定した第 1 旋回歩容初期（時刻  
0）支持脚足平位置姿勢及び第 1 旋回歩容初期（時刻 0）遊脚足平位置  
姿勢）と、各脚体 2 の膝部の曲げ角に関する所定の幾何学的条件とに基  
15 づいて、時刻 0 での各脚体 2 の膝部が伸び切らないような上体鉛直  
位置（上体高さ）が決定される。具体的には、支持脚側脚体 2 の膝曲げ  
角を  $\theta_{sup}$ 、遊脚側脚体 2 の膝曲げ角を  $\theta_{swg}$  としたとき、例えばそれ  
らの膝曲げ角  $\theta_{sup}$ 、 $\theta_{swg}$  の正弦値の逆数の和がある所定値（有限  
値）になるように、上体鉛直位置が決定される。ここで、膝曲げ角  $\theta$   
20  $_{sup}$ 、 $\theta_{swg}$  は、各脚体 2 の大腿部の軸心に対する下腿部の軸心の角度  
であり、各脚体 2 が伸びきった状態から膝部を曲げていくに伴い、0 から  
増加していく角度である。なお、このような上体 24 の鉛直位置の決  
定手法は、上記特開平 10－86080 号公報に詳細に説明されている  
ので、ここでは以上の説明に留める。

25    次に、このように決定した時刻 0 における上体鉛直位置や、足平位置  
姿勢などから時刻 0 における全体重心鉛直位置がロボット 1 のモデルを

用いて求められる。例えば図10のモデルに対応する前記式04のキネマティクスモデルを用いることで、時刻0における全体重心鉛直位置が求められる。具体的には、時刻0での上体鉛直位置と上体姿勢角（本実施形態では0）とから上体質点24mの鉛直位置が求められ、時刻0での支持脚足平位置姿勢及び遊脚足平位置姿勢（これらは、前記図14のS100で設定した第1旋回歩容初期支持脚足平位置姿勢及び第1旋回歩容初期遊脚足平位置姿勢である）とからそれぞれ支持脚質点2m及び遊脚質点2mの鉛直位置が求められる。そして、これらの求めた上体質点24m、支持脚質点2m及び遊脚質点2mの鉛直位置を、前記式04のZb、Zsup、Zswgに代入することで、全体重心鉛直位置（式04のZGtotal）が求められる。尚、ロボット1のより厳密なモデル（例えば図11に示すような多質点モデル）を用い、時刻0での上体水平位置や腕姿勢をも考慮して、時刻0での全体重心鉛直位置を求めるようにしてもよい。

次に、前記式13において、上記求めた時刻0における全体重心鉛直位置を同式13の左辺の初期全体重心鉛直位置に代入し、上記求めた時刻0の全体重心鉛直速度を同式13の右辺の初期全体重心鉛直速度に代入し、さらに、同式13の1歩の時間をTsとし、積分期間を時刻0から時刻Tsまでとすることで、式13の左辺の終端全体重心鉛直位置の値が算出され、この算出値が初期（時刻Ts）全体重心鉛直位置として得られる。さらに、この求めた初期（時刻Ts）全体重心鉛直位置と時刻Tsにおける足平位置姿勢（S200で求めたもの）などから、ロボット1のモデル（例えば式04のキネマティクスモデル）を用いて、初期（時刻Ts）上体鉛直位置Zsが求められる。具体的には、時刻Tsにおける支持脚及び遊脚の各平位置姿勢から、図10のモデルの支持脚質点2m及び遊脚質点2mの鉛直位置が求められ、これらの鉛直位置と、

上記求めた初期（時刻  $T_s$ ）全体重心鉛直位置とを式 04 に適用することで、上体質点 24 m の鉛直位置（式 04 の  $Z_b$ ）が求められる。そして、この上体質点 24 m の鉛直位置と時刻  $T_s$  での上体姿勢（本実施形態では 0）とから逆算的に初期（時刻  $T_s$ ）上体鉛直位置  $Z_s$  が求められる。尚、この場合も、より厳密なモデルを用い、上体水平位置や腕姿勢をも考慮して初期上体鉛直位置  $Z_s$  を求めるようにしてもよい。

最後に、前記 S 200 で決定した足平位置姿勢の初期状態や、S 206 で求めた初期全体重心鉛直速度等から、ロボット 1 のモデル（例えば式 04 のキネマティクスモデル）を用いて、初期上体鉛直速度が求められる。具体的には、式 04 の両辺を時間微分してなる式に、前記式 13 に基づいて求めた初期全体重心鉛直速度と、支持脚側及び遊脚側の各足平位置姿勢の初期状態により定まる支持脚質点 2 m 及び遊脚質点 2 m の鉛直速度とを適用することで、上体質点 22 m の鉛直速度が求められる。そして、この上体質点 22 m の鉛直速度と上体姿勢角の初期状態（S 200 もしくは後述の S 208 で決定されたもの）とから、上体鉛直速度が求められる。尚、各足平位置姿勢の初期状態や、初期全体重心鉛直速度のほか、腕姿勢の初期状態（S 200 で決定されたもの）、仮決定した上体水平位置の初期状態（S 202 もしくは後述の S 216 もしくは S 218 で仮決定された最新のもの）、上記求めた初期上体鉛直位置を考慮し、上記求めた初期全体重心鉛直速度を満足するような初期上体鉛直速度を、ロボット 1 のより厳密なモデルを用いて求めるようにしてもよい。

補足すると、ロボット 1 のモデルが図 11 のような複雑なもの（厳密なモデル）であっても、ロボット 1 は、片脚当たり 6 自由度であることから、足平位置姿勢軌道および上体位置姿勢軌道の初期状態（位置姿勢とその変化率）が与えられれば、ロボットの初期状態は一義的にすべて



決定されることになる。したがって、初期全体重心鉛直速度もこれらが与えられれば一義的に決定される。逆に、片脚当たり6自由度であることから、足平位置姿勢軌道および上体位置姿勢軌道の初期状態の中で速度に関する状態のひとつ（例えば初期上体鉛直速度）が未定であっても、

- 5 初期全体重心鉛直速度が与えられれば、未定の初期状態は一義的に決定される。

S 2 0 6 の処理の後、次いで S 2 0 8 に進み、定常旋回歩容が仮に生成される。より具体的には、前記図 1 2 の S 0 2 2 で決定した定常歩容の歩容パラメータを基に、初期時刻  $T_s$  から終端時刻  $T_e$  までの各瞬間

- 10 における目標 Z M P、目標床反力鉛直成分、目標足平位置姿勢、基準上体姿勢、目標腕姿勢および床反力水平成分許容範囲が逐次求められる。そして、求めた目標 Z M P と目標床反力鉛直成分とに関する動力学的平衡条件、並びに床反力水平成分許容範囲の条件を満足するように、前記
- 15 動力学モデル（図 1 0 のモデル）を用いて、前記上体水平位置速度（ $X_s$ ,  $V_{x_s}$ ）、上体鉛直位置速度（ $Z_s$ ,  $V_{z_s}$ ）を上体 2 4 の初期（時刻  $T_s$ ）状態として、上体位置姿勢を逐次決定することによって、時刻  $T_s$  から終端時刻  $T_e$  までの歩容を生成する。また、この時、上体姿勢は、基準上体姿勢になるべく一致するように生成される。

- 尚、この定常歩容の歩容生成は歩容生成装置 1 0 0 の内部で行われる
- 20 だけであって、実際のロボット 1 を駆動するための目標値として、前記複合コンプライアンス動作決定部 1 0 4 に出力されることはない。

以下に、S 2 0 8 の処理である逐次演算による定常歩容生成処理の詳細を説明する。

図 2 0 はその処理を示すサブルーチンフローチャートである。

- 25 以下説明すると、S 3 0 0 において、諸々の初期化が行われる。具体的には、仮歩容生成用時刻  $k$  に初期時刻  $T_s$  を代入する。さらに、上体

水平位置速度に、現在仮決定されている ( $X_s$ ,  $V_{xs}$ ) (図 19 の S 2 0 2 もしくは後述の S 2 1 6 もしくは S 2 1 8 で決定されたもの) が代入され、上体鉛直位置速度に、前記 S 2 0 6 で求めた最新の ( $Z_s$ ,  $V_{zs}$ ) が代入される。また、目標上体姿勢角には、基準上体姿勢角初期値 (時刻  $T_s$  での基準上体姿勢角)、目標上体姿勢角速度には、基準上体姿勢角速度初期値 (時刻  $T_s$  での基準上体姿勢角速度) を代入する。補足すると、後述するごとく最終的には初期目標上体姿勢角速度は変更されるので、基準上体姿勢角速度初期値と異なる値を代入しても良い。

次いで、S 3 0 2 を経て S 3 0 4 において、仮歩容生成用時刻  $k$  が歩容終端時刻以前であるか否か ( $k \leq T_s + T_{cyc}$  であるか否か) が判断され、その判断結果が YES である場合には、S 3 0 6 の歩容瞬時値決定サブルーチンに進み、歩容瞬時値が決定される。次いで歩容生成装置 1 0 0 の処理は、S 3 0 8 に進み、仮歩容生成用時刻  $k$  を  $\Delta k$  だけ増やした後、S 3 0 4 に戻る。

ここで、 $\Delta k$  は、仮歩容生成のインターバルであり、通常、制御周期  $\Delta t$  と一致させておけば良い。なお、 $\Delta k$  は、仮歩容の動力学的精度を落としても良いならば、演算量を低減するために、 $\Delta k$  を  $\Delta t$  よりも長く設定しても良い。

S 3 0 4 の判断結果が NO である場合には、S 3 1 0 に進む。以上の処理により、S 3 1 0 に進むまでに定常歩容が初期から終端まで生成される。

以下に、S 3 0 6 の歩容瞬時値決定サブルーチンの詳細を図 2 1 を参照して説明する。

まず図 2 1 の S 4 0 0 において、定常歩容パラメータ (床反力鉛直成分軌道パラメータ) を基に、前記図 1 6 に示した目標床反力鉛直成分の時刻  $k$  における値 (今回値) が求められる。さらに、S 4 0 2 におい

て、定常歩容パラメータ（ZMP軌道パラメータ）を基に、前記図18に示した目標ZMP軌道の時刻 $k$ における値（今回値）が求められる。

次いでS404に進み、定常歩容パラメータ（足平軌道パラメータ、基準上体姿勢軌道パラメータ、及び腕姿勢軌道パラメータ）を基に、時刻 $k$ における目標両足平位置姿勢（支持脚側及び遊脚側の両者の目標足平位置姿勢）、基準上体姿勢および目標腕姿勢の値（今回値）が求められる。ただし、目標腕姿勢に関しては、より詳しくは両腕体の全体重心位置が決定されるが、鉛直軸（または上体体幹軸）まわりの角運動量を変化させる腕体の運動（腕振り運動）は、未だ決定されていない。尚、

目標足平位置姿勢の今回値（時刻 $k$ での値）は、前記図19のS200で初期時刻 $T_s$ での足平位置姿勢を求めた場合と同様に求められる。

次いでS406に進み、目標床反力鉛直成分を満足する（ロボット1の鉛直方向の慣性力と重力との和を目標床反力鉛直成分に釣り合わせる）ような時刻 $k$ における全体重心鉛直位置速度の値（今回値）が算出される。具体的には、例えば前記図10の動力学モデルに係わる前記式01と式04とに基づいて、全体重心鉛直位置速度が算出される。すなわち、式01と式04とによれば、ロボット1の運動による全体重心鉛直加速度と重力加速度との和にロボット1の全体質量を乗算したものが床反力鉛直成分に等しいという関係式（ロボット1の全体重心の鉛直方向に関する運動方程式）が得られる。従って、この関係式と目標床反力鉛直成分とから、全体重心鉛直加速度が求められる。

尚、この関係式自体は、ロボット1のモデルに依存することなく一般的に成立するものである。そして、この求めた全体鉛直加速度を積分することにより、全体重心鉛直速度が算出され、さらにその全体重心鉛直速度を積分することにより、全体重心鉛直位置が算出される。これらの算出は、より一般的には、次式15および式16で表される動力学関係

式（ニュートンの運動方程式を離散化した式）を用いて行なわれる。

時刻  $k$  における全体重心鉛直速度

= 時刻  $(k - \Delta k)$  における全体重心鉛直速度

5 + ((床反力鉛直成分 / ロボットの全体質量) + 重力加速度) \*  $\Delta k$

(ただし、重力加速度は負の値とする。)

…式 1 5

時刻  $k$  における全体重心鉛直位置

10 = 時刻  $(k - \Delta k)$  における全体重心鉛直位置

+ 時刻  $k$  における全体重心鉛直速度 \*  $\Delta k$

…式 1 6

次いで S 4 0 8 に進み、全体重心鉛直位置を満足する上体鉛直位置が  
 15 算出される。具体的には、例えば前記図 1 0 のモデルに係わる式 0 4 を  
 用いて上体鉛直位置が算出される。すなわち、支持脚側及び遊脚側の目  
 標足平位置姿勢の今回値から、図 1 0 のモデルの支持脚質点 2 m 及び遊  
 脚質点 2 m の鉛直位置が求められる。そして、これらの求めた支持脚質  
 点 2 m 及び遊脚質点 2 m の鉛直位置と、S 4 0 7 で求めた全体重心鉛直  
 20 位置の今回値とを式 0 4 に適用することで、上体質点 2 4 m の鉛直位置  
 が求められる。さらに、この求めた上体質点 2 4 m の鉛直位置と目標上  
 体姿勢角の現在値（S 4 0 4 で設定された基準上体姿勢角または後述の  
 S 4 1 4 で決定された前回（時刻  $k - \Delta k$ ）の目標上体姿勢角）とから  
 上体鉛直位置が求められる。

25 尚、より厳密なモデル（例えば図 1 1 に示すようにロボット 1 の各リ  
 ンクに対応する質点をもたせたような多質点モデル）を用いて上体鉛直

位置を求めてもよい。この場合には、前記求めた目標両足平位置姿勢の  
今回値（時刻  $k$  の値）、時刻  $(k - \Delta k)$  の目標上体姿勢（または前記求め  
た基準上体姿勢の今回値）、前記求めた目標腕姿勢（両腕の重心位置）  
の今回値、時刻  $(k - \Delta k)$  の上体水平位置と、求めたい上体鉛直位置とから  
5 決定される全体重心鉛直位置が、前記求めた全体重心鉛直位置の今回  
値に一致するように上体鉛直位置が求められる。

この場合、時刻  $k$  の上体姿勢と上体水平位置は、未だ決定されてい  
ないので、代わりに時刻  $(k - \Delta k)$  の値を用いた。より精度を高めるため  
に、時刻  $k$  での推定値を、時刻  $(k - \Delta k)$  での歩容状態から外挿によって  
10 求めても良い。

次いで S 4 1 0 に進み、前記図 1 4 の S 1 0 8 で決定した歩容パラメ  
ータ（定常歩容の床反力水平成分許容範囲を規定するパラメータ）に基  
づいて、図 1 7 に示した床反力水平成分許容範囲  $[F_{xmin}, F_{xmax}]$  の時  
刻  $k$  における値（今回値）が求められる。

15 次いで S 4 1 2 に進み、目標 ZMP に関する動力学的平衡条件（ロボ  
ット 1 の慣性力と重力との合力が目標 ZMP まわりに発生するモーメン  
トの水平成分が 0 であるという条件）を満足するように、上体水平加速  
度と上体姿勢角加速度との今回値が決定される。ただし、床反力水平成  
分  $F_x$  が  $[F_{xmin}, F_{xmax}]$  を越えず、かつ、上体姿勢角速度が定常歩容  
20 の初期と終端とで一致するように、上体水平加速度と上体姿勢角加速  
度とが決定される。以下にこの詳細を説明する。

この時点において、前記の如く足平位置姿勢および上体鉛直位置の瞬  
時値（今回値）が決定されているので、残りの上体水平位置と上体姿勢  
角とを決定すれば、鉛直軸まわりの角運動量を変化させる腕体の運動自  
25 由度を除いて、ロボット 1 の目標運動は一義的に決定できる。したがっ  
て、上体水平位置と上体姿勢角とを決定すれば、床反力の鉛直軸まわり

のモーメントを除き、すべての床反力も一義的に決定される。なお、本実施形態では、定常歩容の目標床反力鉛直成分及び目標ZMPは、それぞれ前記図12のS022で決定した床反力鉛直成分軌道パラメータ及び目標ZMP軌道パラメータによって規定される。したがって、上体水平位置と上体姿勢角の決定に応じて従属的に決定される床反力は、床反力水平成分のみである。また、補足すると、前述したように、ロボット1は片脚当たり6自由度であることから、目標足平位置姿勢と目標上体位置姿勢とから脚体2の各部の位置姿勢は一義的に決定される。なお、鉛直軸まわりの角運動量を変化させる腕の運動自由度は、後述するように、スピンを打ち消すために用いられる。

ところで、歩容生成において、前記上体並進モードをあまり用いずに主に上体回転モードを用いることにより、目標ZMPを満足させる（目標ZMPまわりの床反力モーメントの水平成分を0にする）と、上体姿勢角が大きく振れ過ぎてしまう恐れがある。したがって、これを防ぐためには、なるべく上体並進モードを優先的に用いるべきである。しかし、上体並進モードは、床反力水平成分の変化を伴うので、床反力水平成分許容範囲が狭い場合には、上体並進モードを強く働かせるとスリップする恐れがある。この場合には、上体回転モードに頼るしかない。特に、前記走行歩容のように床反力水平成分許容範囲が0となる期間では、床反力水平成分を発生させるような歩容を生成することはできないので、上体回転モードに頼らざるを得ない。以上のことを考慮し、本実施形態では、図22に示すフローチャートに従って、上体水平加速度と上体姿勢角加速度とが決定される。

まず、S500において、初期時刻  $T_s$  から第1旋回歩容の空中期を経て第2旋回歩容になり、床反力鉛直成分がある所定の大きさまで増加した時刻  $T_m$  が設定される。さらに、第2旋回歩容の片脚支持期の後半

において床反力鉛直成分がある程度減少した時刻  $T_{s2}$  が設定される。  
さらに、第2旋回歩容の空中期を経て第1旋回歩容になり、床反力鉛直成分がある所定の大きさまで増加した時刻  $T_{m2}$  が設定される。

5 図16にこれらの時刻を示す。時刻  $T_m$  は、支持脚足平22の底面のほぼ全面が接地した瞬間あるいはその直後に設定するのが望ましい。時刻  $T_{m2}$  も同様である。また、時刻  $T_{s2}$  は、前記初期時刻  $T_s$  同様、足平22の底面のほぼ全面が接地した状態からつま先接地に変わる瞬間あるいはその直前に設定するのが望ましい。

10 また、前記図14のS110において設定した図18の目標ZMPとこれらの時刻  $T_m$ ,  $T_{s2}$ ,  $T_{m2}$  との関係を説明すると、第2旋回歩容において、目標ZMPが、支持脚足平22のかかとを初期位置として、該足平22の底面のほぼ全体が接地するまでその位置に留まり、次に支持脚足平22の中央に移動し始める瞬間を時刻  $T_m$  とすることが望ましい。その後、支持脚足平22のつま先だけ接地した状態になるまでに、目標  
15 ZMPがつま先に移動を完了した瞬間を、時刻  $T_{s2}$  とすることが望ましい。さらに次の第1旋回歩容において、目標ZMPが、支持脚足平22のかかとを初期位置として該足平22の底面のほぼ全体が接地するまでその位置に留まり、次に支持脚足平22の中央に移動し始める瞬間を時刻  $T_{m2}$  とすることが望ましい。

20 上記のごとく設定する理由は後述する。

次にS502において現在時刻（定常歩容作成用タイマーの値） $k$  が、時刻  $T_s$  から  $T_m$  の間または時刻  $T_{s2}$  から  $T_{m2}$  の間にあるか否かが判定される。S502の判定結果がYESであるならば、S504に進み、NOであるならばS518に進む。

25 S504では、ロボット1の前回瞬時歩容状態（時刻  $k-1$  の歩容状態）から、仮に、上体回転モードの角加速度を0にして、上体並進モー

ドの運動をロボット1にさせた場合に今回（時刻k）の目標ZMPを満足するために必要な上体水平加速度 $\alpha_{tmp}$ が求められる。この $\alpha_{tmp}$ は、例えば前記図10の動力学モデルに係わる前記式03を用いて求められる。より具体的には、例えば、現在時刻kまでに求められた目標足

5 平位置姿勢の時系列値を用いて、現在時刻kにおける支持脚質点2m及び遊脚質点2mの鉛直加速度が求められると共に、現在時刻k（今回）の目標足平位置姿勢を用いて支持脚質点2m及び遊脚質点2mの鉛直位置が求められる。また、現在時刻k（今回）の床反力鉛直位置を用いて上体質点24mの鉛直位置が求められると共に、現在時刻kまでに求め

10 た目標上体鉛直位置の時系列値を用いて現在時刻kにおける上体質点24mの鉛直加速度が求められる。そして、これらの求めた値を前記式03に代入すると共に、同式03の $M_y$ 、 $d^2\theta_{by}/dt^2$ を0にしてなる式を、 $d^2X_b/dt^2$ について解くことにより、上体質点水平加速度 $d^2X_b/dt^2$ が上体水平加速度 $\alpha_{tmp}$ として求められる。尚、より厳密な動力学モデルを用いて、目標ZMP回りの床反力モーメントの水平成分を零にする

15 ような上体水平加速度 $\alpha_{tmp}$ を探索的に求めるようにしてもよい。また、本実施形態では、基準上体姿勢が鉛直姿勢で、基準上体姿勢による上体姿勢角加速度が0であるため、上体回転モードの角加速度を0にして上体水平加速度 $\alpha_{tmp}$ を求めるようにした。但し、基準上体姿勢が

20 変化するように該基準上体姿勢軌道パラメータを設定した場合で、それにより定まる現在時刻kにおける基準上体姿勢角加速度が0でない場合には、上体回転モードの角加速度をその0でない基準上体姿勢角加速度の値にして、上体水平加速度 $\alpha_{tmp}$ を動力学モデルを用いて求める（例えば式03の $d^2\theta_{by}/dt^2$ を0でない基準上体姿勢角加速度に設定

25 して上記と同様に上体水平加速度 $\alpha_{tmp}$ を求める）ようにすればよい。

次に、S506に進み、上体水平加速度が $\alpha_{tmp}$ の場合の時刻kに



おける床反力水平成分  $F_{xtmp}$  が動力学モデルを用いて求められる。本実施形態においては、前記動力学モデルの式 02 を用いて  $F_{xtmp}$  が求められる。すなわち、次式 17 によって  $F_{xtmp}$  が求められる。但し、 $d2X_{sup}/dt2$  および  $d2X_{swg}/dt2$  はそれぞれ時刻  $k$  における支持脚足  
 5 平質点水平加速度、遊脚足平質点水平加速度を表す。

$$F_{xtmp} = m_b * \alpha_{tmp} + m_{sup} * d2X_{sup}/dt2 + m_{swg} * d2X_{swg}/dt2 \quad \dots \text{式 17}$$

10 このようにして求められる  $F_{xtmp}$  の例を図 23 に示す。図 23 に、 $F_{xtmp}$  が床反力水平成分許容範囲  $[F_{xmin}, F_{xmax}]$  を越えている部分を斜線で示す。

次に、S 508 に進み、上体並進モードの上体水平加速度  $\alpha$ 、これによって発生する床反力水平成分  $F_x$ 、上体回転モードの上体角加速度  $\beta$   
 15 が次のように決定される (S 508 ~ S 516)。

すなわち、

$F_{xtmp} > F_{xmax}$  ならば、S 510 に進み、次式により  $F_x$  が決定される。

$$F_x = F_{xmax} \quad \dots \text{式 18}$$

20  $F_{xtmp} < F_{xmin}$  ならば、S 512 に進み、次式により  $F_x$  が決定される。

$$F_x = F_{xmin} \quad \dots \text{式 19}$$

それ以外、すなわち、 $F_{xtmp}$  が、床反力水平成分許容範囲  $[F_{xmin}, F_{xmax}]$  内に存するならば、S 514 に進み、次式により  $F_x$  が決定される。  
 25

$$F_x = F_{xtmp} \quad \dots \text{式 20}$$

いずれの場合においても、次いで S 5 1 6 に進み、次式により上体水平加速度  $\alpha$ 、上体姿勢角加速度  $\beta$  が決定される。

5

$$\alpha = \alpha_{tmp} + (F_x - F_{xtmp}) / \Delta F_p \quad \dots \text{式 21}$$

$$\beta = (\alpha_{tmp} - \alpha) * \Delta M_p / \Delta M_r \quad \dots \text{式 22}$$

ただし、 $\Delta F_p$ 、 $\Delta M_p$  および  $\Delta M_r$  はそれぞれ前記式 0 6、0 7、  
10 および式 0 9 により決定される。

補足すると、より動力学演算の精度を高めようとするならば、上記のごとく上体角加速度  $\beta$  を求めた後、上体並進モードと上記求めた上体角加速度  $\beta$  の上体回転モードとを合成した運動が目標 ZMP を満足するように、上体並進モードの上体水平加速度  $\alpha$  を、より厳密な動力学モデル  
15 を用いて解析的あるいは探索的に決定した方が良い。なお、探索的な決定法としては、擬似ヤコビアン（感度マトリックス）を求め、擬似ニュートン法などにより次候補を決定する方法や、シンプレックス法などを用いれば良い。

さらに床反力水平成分  $F_x$  が床反力水平成分許容範囲 [ $F_{xmin}$ ,  $F_{xmax}$ ] を厳密に越えないようにするために、S 5 1 0 においては、 $F_x = F_{xmax}$  かつ目標 ZMP まわりの床反力モーメントの水平成分が 0 になるように、S 5 1 2 においては、 $F_x = F_{xmin}$  かつ目標 ZMP まわりの床反力モーメントの水平成分が 0 になるように、上体水平加速度  $\alpha$  と上体角加速度  $\beta$  との組を探索的に求めても良い。

25 上記のように求められる  $F_x$  を図 2 4 に示す。 $F_x$  は、 $F_{xtmp}$  の値を床反力水平成分許容範囲 [ $F_{xmin}$ ,  $F_{xmax}$ ] から越えないように制限（飽

和) させたものになっている。より詳しくは、上体並進モードのみによる上体水平加速度  $\alpha_{tmp}$  に応じた  $F_{tmp}$  が許容範囲  $[F_{xmin}, F_{xmax}]$  内にある場合には、 $F_{tmp}$  がそのまま  $F_x$  となる。また、上体並進モードのみによる上体水平加速度  $\alpha_{tmp}$  に応じた  $F_{tmp}$  が許容範囲  $[F_{xmin}, F_{xmax}]$  の上限を超え、もしくは下限を下回った場合には、それぞれ  $F_x$  は、それぞれ強制的に  $F_{xmax}, F_{xmin}$  に制限される。特に走行歩容の空中期では、常に、 $F_{xmax}=F_{xmin}=0$  であるので、 $F_x=0$  となる。

また、上記のように求められる上体姿勢角加速度  $\beta$  を図 25 に示す。上体並進モードによって発生する  $F_x$  が許容範囲  $[F_{xmin}, F_{xmax}]$  を越えないように、上体並進モードの加速度を制限したことによって不足した床反力モーメント (より詳しくは目標 ZMP 回りの床反力モーメントの水平成分を 0 にする上で必要な慣性力モーメントから、制限した上体水平運動と両脚体 2, 2 の運動とによるモーメント成分を差し引いたモーメント) を、上体回転モードで補ったことになる。なお、走行歩容の空中期では、上体並進モードによる上体水平加速度  $\alpha$  は常に 0 に制限されることとなるので、上体回転モードによる上体姿勢角加速度  $\beta$  のみによって、上記不足分の床反力モーメントが補われることとなる。

以上が、時刻  $k$  が時刻  $T_s$  から  $T_m$  の間または時刻  $T_{s2}$  から  $T_{m2}$  の間の場合の処理である。

S 5 0 2 の判定結果が NO である場合には以下の処理が行われる。まず、S 5 1 8 に進み、上体姿勢角速度を、現在時刻  $k$  が時刻  $T_{s2}$  以前ならば時刻  $T_{s2}$  までに、そうでないならば時刻  $T_e$  までに、初期値 (現在時刻  $k$  が時刻  $T_{s2}$  以前ならば時刻  $T_s$  での値、そうでないならば時刻  $T_{s2}$  での値) に戻すための上体姿勢角加速度を発生させる床反力モーメントの ZMP 換算値 (以降、上体姿勢復元モーメント ZMP 換算値と呼び、ZMP<sub>rec</sub> と略す) のパターンを設定する。

これについて以下に詳細に説明する。現在時刻  $k$  が時刻  $T_{m2}$  以降の時期の処理は、時刻  $T_{s2}$  以前の時期の処理と同様なので、現在時刻  $k$  が時刻  $T_{s2}$  以前までの時期の処理だけを解説する。

時刻  $T_m$  から時刻  $T_{s2}$  までに、上体回転モードを用いて上体姿勢角  
5 加速度を発生させることにより、上体姿勢角速度を初期値（時刻  $T_s$  での値）に戻すことを考える。このための上体姿勢角加速度パターンを、 $\beta(k)$  とする。

上体回転モードでは、上体姿勢角加速度  $\beta(k)$  を発生させようとする  
と、床反力モーメント  $\beta(k) * \Delta M_r$  が発生する。この結果、その瞬間  
10 における床反力鉛直成分が  $F_z(k)$  であるとする、（目標 ZMP でなく）運動から算出される ZMP( $k$ ) は、次式で求められる  $\Delta ZMP$  だけずれる。

$$\Delta ZMP(k) = -\beta(k) * \Delta M_r / F_z(k) \quad \cdots \text{式 23}$$

15

したがって、 $\Delta M_r$  のパターンと  $F_z(k)$  のパターンが決まっていれば  
（既知であれば）、 $\Delta ZMP(k)$  のパターンを適当に設定することによ  
って、式 23 を満足する上体姿勢角加速度パターンを発生させて、上体  
姿勢角速度を初期値（時刻  $T_s$  での値）、すなわち基準上体姿勢軌道の  
20 初期（時刻  $T_s$ ）状態における上体姿勢角速度に戻すことができる。

前記上体姿勢復元モーメント ZMP 換算値（ZMP<sub>rec</sub>）は、そのよ  
うに適切に設定された  $\Delta ZMP(k)$  を意味する。前記式 23 を用いて上  
体姿勢復元モーメント ZMP 換算値を設定する際に、 $\Delta M_r$  は厳密には  
変動するが、近似的に一定値としても良い。定常歩容は仮に生成される  
25 だけであり、実際のロボットをこの歩容に追従させるわけではないので、  
定常歩容の動力学的精度はあまり高くなくても良いからである。

図 2 6 に Z M P rec の一例を示す。図 2 6 では、そのパターンは台形パターンとされている。その台形部の折れ点の時刻は、時刻  $T_m$  と時刻  $T_{s2}$  との間の期間における目標 Z M P パターンの折れ点の時刻（図 1 8 参照）に一致させてある。これは、後述するが、今回歩容の目標 Z M P

5 パターンの修正が簡単になるからである。式 2 3 の  $\Delta Z M P(k)$  に Z M P rec を代入することにより次式が得られる。

$$\beta(k) = -Z M P rec * Fz(k) / \Delta M r \quad \cdots \text{式 2 4}$$

10 したがって、この式 2 4 で求められる  $\beta(k)$  は、図 2 7 の実線で示すようになる。なお、図 2 7 の点線で示すものは、時刻  $T_s$  から時刻  $T_m$  までの上体姿勢角加速度（図 2 5 の実線示のもの）である。

ところで、定常歩容では、時刻  $T_{s2}$  での上体姿勢角速度が時刻  $T_s$  での上体姿勢角速度に一致していることが望ましい。一致していると、上

15 体姿勢角の変動が小さくなるからである。

そこで、時刻  $T_{s2}$  での上体姿勢角速度を時刻  $T_s$  での上体姿勢角速度に一致させるため、時刻  $T_s$  から  $T_{s2}$  までの上体姿勢角加速度  $\beta$  の積分値が 0 になるように、上体姿勢角加速度パターンを設定する。すなわち、時刻  $T_m$  から時刻  $T_{s2}$  までの期間の  $\beta(k)$  の積分値（図 2 7 の実線部の

20 積分値）が、時刻  $T_s$  から時刻  $T_m$  までの上体姿勢角加速度（これは図 2 2 の S 5 0 4 ~ S 5 1 6 で前述のように求められる）の積分値（図 2 7 の点線部の積分値、言い換えれば時刻  $T_m$  における上体姿勢角速度と時刻  $T_s$  における上体姿勢角速度の差）に  $-1$  を乗じた値になるように設定される。

25 より具体的には、本実施形態では、図 2 6 の Z M P rec の台形パターンにおいて、台形の折れ点の時刻（これは前述のように定常歩容の目標

ZMP軌道に基づいて決定される)を既知とし、台形高さを未知数とすることで、上記関係を満足するZMP<sub>rec</sub>の台形高さ(ZMP<sub>rec</sub>パターンを規定するパラメータ)が求められる。

- 第1旋回歩容におけるZMP<sub>rec</sub>の台形高さを第1旋回歩容上体姿勢復元モーメントZMP換算値台形高さacyc1と呼ぶ。第2旋回歩容におけるZMP<sub>rec</sub>の台形高さを第2旋回歩容上体姿勢復元モーメントZMP換算値台形高さacyc2と呼ぶ。なお、第2旋回歩容におけるZMP<sub>rec</sub>は、時刻T<sub>m2</sub>からT<sub>e</sub>までの期間で設定される台形パターンである。
- 10 補足すると、今回歩容を1歩生成している途中で歩容パラメータが変更されない限り、時刻T<sub>m</sub>とT<sub>s2</sub>との間の期間、又は時刻T<sub>m2</sub>とT<sub>e</sub>との間の期間においてS518で決定されるZMP<sub>rec</sub>パターンは変わらない(同一パラメータ値が算出される)ので、S518の処理は、時刻T<sub>m</sub>と時刻T<sub>m2</sub>でのみ実行しても良い。
- 15 次いでS520に進み、時刻kにおける上体姿勢復元モーメントZMP換算値ZMP<sub>rec</sub>の瞬間値(今回値)が、上記のごとく決定したパラメータ(台形高さ)を基に算出される。
- 次いでS522に進み、前記式24を用いて、時刻kにおける上記上体姿勢角加速度パターンの瞬間値(今回値) $\beta$ が算出される。
- 20 次いでS524に進み、ロボットの前回瞬時目標歩容状態(時刻k-1の目標歩容状態)から、仮に上体回転モードをさせずに上体並進モードの運動のみをさせた場合に、今回(時刻k)の目標ZMPを満足するために必要な上体水平加速度 $\alpha_{tmp}$ が、ロボット1の動力学モデルを用いて求められる。この算出は、S504と同様に行なわれる。
- 25 次いでS526に進み、次式を用いて、上体並進モードの上体水平加速度 $\alpha$ が算出される。

$$\alpha = \alpha_{tmp} - (\Delta M_r / \Delta M_p) * \beta \quad \dots \text{式 2 5}$$

さらに S 5 2 8 に進み、上体水平加速度が上記の如く求めた  $\alpha$  である場合の時刻  $k$  における床反力水平成分  $F_x$  が、前記式 1 7 と同様の次式 5 2 6 によって求められる。

$$F_x = m_b * \alpha + m_{sup} * d^2 X_{sup} / dt^2 + m_{swg} * d^2 X_{swg} / dt^2 \quad \dots \text{式 2 6}$$

10 補足すると、より動力学演算の精度を高めようとするならば、上記のごとく上体角加速度  $\beta$  を求めた後、S 5 2 6 において、式 2 5 を用いた上体水平加速度  $\alpha$  の算出を実行する代わりに、S 5 1 6 の補足で解説した手法と同様、上体並進モードと上記求めた上体角加速度  $\beta$  の上体回転モードを合成した運動が目標 ZMP を満足するように、上体並進モード  
15 の上体水平加速度  $\alpha$  を、より厳密な動力学モデルを用いて、解析的あるいは探索的に決定した方が良い。

以上が、時刻  $k$  が時刻  $T_s$  から  $T_m$  の間または時刻  $T_{s2}$  から  $T_{m2}$  の間のいずれでもない場合の処理である。

以上の処理を時刻  $T_{s2}$  まで完了した時の、床反力水平成分  $F_x$  を図 2  
20 8 に示す。さらに、以上の処理を時刻  $T_e$  まで完了した時の、床反力水平成分  $F_x$  を図 2 9 に、上体姿勢角加速度  $\beta$  を図 3 0 に示す。なお、以上に示した S 4 1 2 の処理（上体水平加速度と上体姿勢角加速度を決定するサブルーチン）は、時刻  $k$  における上体水平加速度と上体姿勢角加速度の瞬間値が決定されるのであって、時刻  $T_e$  までのこれらの時系列  
25 が一度に生成されるわけではない。

なお、本実施形態では、基準上体姿勢が鉛直姿勢で、基準上体姿勢に

よる上体姿勢角加速度が0であるため、上記の如く求めた上体回転モードの角加速度 $\beta$ をS412の処理で決定される上体姿勢角加速度とした。但し、基準上体姿勢が変化するように該基準上体姿勢軌道パラメータを設定した場合には、上記の如く求めた上体回転モードの角加速度 $\beta$ と基準上体姿勢角加速度の和をもって、S412の処理で決定される上体姿勢角加速度とすべきである。

時刻  $T_s$ 、 $T_m$ 、 $T_{s2}$  および  $T_{m2}$  を前記のごとく設定した理由は、時刻  $T_m$  から  $T_{s2}$  までの期間と時刻  $T_{m2}$  から  $T_e$  までの期間とにおいて、上体姿勢角速度を基準上体姿勢軌道の初期角速度に戻すように上体姿勢角加速度 $\beta$ を発生させても、床反力水平成分  $F_x$  が許容範囲 [ $F_{xmin}$ ,  $F_{xmax}$ ] を越えないようにするためである。換言すれば、時刻  $T_m$  から  $T_{s2}$  までの期間と時刻  $T_{m2}$  から  $T_e$  までの期間とにおいては、床反力水平成分許容範囲が十分に大きいため、目標 ZMP を満足しつつ、上体姿勢角速度を戻すように上体姿勢角加速度 $\beta$ を発生させても、床反力水平成分  $F_x$  は、許容範囲を越えることがない。

また、時刻  $T_s$  での上体姿勢角速度を時刻  $T_s$  での上体姿勢角速度に一致させることを考えず、 $acyc1$  と  $acyc2$  を同一値として ( $acyc1 = acyc2$  として)、時刻  $T_e$  での上体姿勢角速度と時刻  $T_s$  での上体姿勢角速度に一致させるように  $acyc1$  および  $acyc2$  の値を決定しても良い。

次いで図21のS414に進み、S412で求めた上体水平加速度を逐次積分する（時刻  $T_s$  から現在時刻  $k$  まで累積加算する）ことにより上体水平速度が求められ、さらにその上体水平速度を逐次積分する（時刻  $T_s$  から現在時刻  $k$  まで累積加算する）ことにより、上体水平位置（今回値）が求められる。また、S412で求めた上体姿勢角加速度を逐次積分する（時刻  $T_s$  から現在時刻  $k$  まで累積加算する）ことにより上体姿勢角速度が求められ、さらにその上体姿勢角速度を逐次積分する



(時刻  $T_s$  から現在時刻  $k$  まで累積加算する) ことにより、上体姿勢角 (今回値) が求められる。

以上のごとく図 20 の S 3 0 6 の定常歩容瞬時値決定サブルーチンが実行された後、S 3 0 8 に進み、歩容生成用時刻  $k$  の値が歩容生成インターバル  $\Delta k$  だけ増加される。次いで S 3 0 4 に戻り、S 3 0 4 に示す条件が成立している限り、S 3 0 6 と S 3 0 8 の処理が繰り返され、S 3 0 4 に示す条件が成立しなくなったら、すなわち終端 (時刻  $T_e = T_s + T_{cyc}$ ) まで仮定常歩容の生成が完了したら、S 3 1 0 に進む。S 3 1 0 では、次式に従って初期 (時刻  $T_s$ ) 上体姿勢角と初期 (時刻  $T_s$ ) 上体姿勢角速度が、上記求めた仮歩容の終端 (時刻  $T_e$ ) 上体姿勢角などを基に修正される。この修正は、上体姿勢角及びその角速度に関する定常歩容の境界条件 (定常歩容の初期と終端とで上体姿勢角及び角速度を一致させる) を満たすようにするためのものである。尚、ここでの説明では、ロボット 1 の歩容は、該ロボット 1 を直線的に移動させる歩容であるとする。

この場合、次式の新たな値が修正された値である。

新たな初期上体姿勢角速度

= 仮歩容の初期上体姿勢角速度

20      - (仮歩容の終端上体姿勢角 - 仮歩容の初期上体姿勢角) /  $T_{cyc}$

…式 3 0

新たな初期上体姿勢角 = 初期 (時刻  $T_s$ ) 基準上体姿勢角

…式 3 1

ここで、上記式 3 0 により初期状態姿勢角速度を修正する理由を以下に説明する。定常歩容では、それを繰り返したときに境界でロボット 1 の運動状態が不連続にならないように (前記境界条件を満たすように)

初期状態姿勢角及びその角速度を決定する必要がある。この場合、上述のように求めた仮定常歩容の終端上体姿勢角速度は、前述した上体姿勢復元モーメントZMP換算値ZMP<sub>rec</sub>に対応する上体姿勢角加速度パターンの設定によって、初期上体姿勢角速度初期値（基準上体姿勢角速度初期値）に一致するように生成されているので、残りの条件である次式を満たせば、上体姿勢角及び角速度に関する上記条件を満足する。

$$\text{終端上体姿勢角} = \text{初期上体姿勢角} \quad \dots \text{式 3 2}$$

10 また、

$$\text{上体姿勢角の 2 階微分} = \text{上体姿勢角加速度} \quad \dots \text{式 3 3}$$

であるから、この式 3 3 の両辺を定常歩容の初期から終端まで 2 階積分することにより、次式の関係を得る。

$$\begin{aligned} \text{終端上体姿勢角} = & \text{初期上体姿勢角} \\ & + \text{初期上体姿勢角速度} * T_{cyc} \\ & + \text{上体姿勢角加速度の 2 階積分値} \end{aligned}$$

$$\dots \text{式 3 4}$$

一方、定常歩容生成においては、前記の如く目標ZMPを満足するために、基本的には上体並進運動モードを用いて上体24の水平加速度（水平加減速）を調整するが、目標ZMPを満足するための上体24の水平加速度が、十分に発生できない状況（十分な摩擦力が発生できない状況）では、上体回転運動モードを用いて全体重心加速度が変わらない

ようにしつつ上体姿勢角の角加速度を調整することで、上体並進運動モードによる上体水平加速度の不足分が補われる。

上記上体回転運動モードを用いて上体姿勢角加速度を調整する動作は、図10に示すフライホイールFHが備わったロボット1のモデルにおいて、そのフライホイールFHの角加速度を調整することと近似的に等価である。フライホイールFHの回転速度が0に近いならば、ジャイロ効果は発生せず、フライホイールFHが発生する力は、フライホイールFHの角加速度だけで決定される。したがって、上体24にフライホイールFHが備わったロボット1においては、フライホイールFHの初期角度・角速度が多少変わっても、該フライホイールFHを同じパターンの角加速度で動かせば、発生する力はほとんど変わらない。それ故、ロボット動力学方程式である式01、式02、式03ではジャイロ効果を見無視している。したがって、本実施形態のロボット1において、式01、式02、式03、あるいは、より一般的で厳密な動力学モデルのいずれを用いた場合でも、全体重心加速度が変わらないようにしつつ上体姿勢角を同じパターンの角加速度で動かせば（すなわち上体回転運動モードを用いて、上体姿勢角を同じパターンの角加速度で動かせば）、初期上体姿勢角度・角速度を少々変えても、発生する慣性力と重力との合力はほぼ同じになる。言い換えれば、初期上体姿勢角度・角速度を少々変えても、上記のフローチャートに従って生成される歩容の上体姿勢角加速度は同じになる。

つまり、式34における上体姿勢角加速度の2階積分値は、初期上体姿勢角度・角速度に依存しなくなる。すなわち、式34における上体姿勢角加速度の2階積分値は、初期上体姿勢角度・角速度の値に関わらず、一定値として扱うことができる。

初期上体姿勢角の値が仮歩容の初期上体姿勢角、かつ初期上体姿勢角

速度の値が仮歩容の初期上体姿勢角速度であった場合に、終端上体姿勢角が仮歩容の終端上体姿勢角になったのであるから、この関係を式 3 4 に代入して次式を得る。

$$\begin{aligned}
 5 \quad & \text{仮歩容の終端上体姿勢角} = \text{仮歩容の初期上体姿勢角} \\
 & + \text{上体姿勢角加速度の 2 階積分値} \\
 & + \text{仮歩容の初期上体姿勢角速度} * T_{cyc} \\
 & \dots \text{式 3 5}
 \end{aligned}$$

これより、

$$\begin{aligned}
 10 \quad & \text{上体姿勢角加速度の 2 階積分値} \\
 & = (\text{仮歩容の終端上体姿勢角} - \text{仮歩容の初期上体姿勢角}) \\
 & - \text{仮歩容の初期上体姿勢角速度} * T_{cyc} \\
 & \dots \text{式 3 6}
 \end{aligned}$$

上記議論により上体姿勢角加速度の 2 階積分値は定数扱いできる（初期上体姿勢角度・角速度に依存しない）ので、上式を式 3 4 に代入し、次式が得られる。

$$\begin{aligned}
 20 \quad & \text{終端上体姿勢角} = \text{初期上体姿勢角} \\
 & + (\text{仮歩容の終端上体姿勢角} - \text{仮歩容の初期上体} \\
 & \text{姿勢角}) \\
 & - \text{仮歩容の初期上体姿勢角速度} * T_{cyc} \\
 & + \text{初期上体姿勢角速度} * T_{cyc} \\
 & \dots \text{式 3 7}
 \end{aligned}$$

式 3 7 と式 3 2 とから前記式 3 0 が得られる。

25     なお、初期上体姿勢角は、本実施形態では、式 3 1 のように基準上体姿勢角初期値に一致させるようにしたが、定常歩容の上体姿勢角の平均

値が基準上体姿勢角初期値に一致するように初期上体姿勢角を設定するようにしてもよい。あるいは、定常歩容の上体姿勢角の最大値と最小値の平均値が基準上体姿勢角初期値に一致するように初期上体姿勢角を設定しても良い。

- 5 また、前記ではロボット1を直進移動させる場合に限定した例を説明したが、旋回移動を含む定常歩容を決定する場合には、その初期と終端とではロボット1の進行方向が変わる。このため初期上体姿勢角速度は初期上体姿勢角に依存するようになる。したがって、これを考慮して初期上体姿勢角および角速度を決定する必要がある。この場合には、例えば次の式37a、37bを満たすように初期上体姿勢角及び初期上体姿勢角速度を更新するようにすればよい。

終端上体姿勢角－初期上体姿勢角

- 15 = 床反力水平成分許容範囲を満たすように決定された上体姿勢角加速  
度の2階積分

+ Z M P<sub>rec</sub>によって発生する上体姿勢角加速度の2階積分

+ 初期上体姿勢角速度 \* 定常歩容の周期 …式37a

終端上体姿勢角速度－初期上体姿勢角速度

- 20 = 床反力水平成分許容範囲を満たすように決定された上体姿勢角加速  
度の1階積分

+ Z M P<sub>rec</sub>によって発生する上体姿勢角加速度の1階積分

……式37b

- 25 なお、式37a、37bのそれぞれの右辺第1項の積分期間は、時刻  
TsからTmまでの期間と、Ts2からTm2までの期間とを合わせた期間  
であり、右辺第2項の積分期間は、時刻TmからTs2までの期間と

Tm2 から Te までの期間とを合わせた期間である。

より具体的に説明すると定常歩容では、第 1 旋回歩容の支持脚座標系（次回歩容支持脚座標系）から見た初期状態姿勢角及び角速度が、それぞれ、次の第 1 旋回歩容の支持脚座標系（次々次回歩容支持脚座標系）から見た終端上体姿勢角および角速度に一致していなければならない。そこで、本実施形態では、新たな初期上体姿勢角は、前記式 3 1 により決定し、この新たな初期上体姿勢角と、これを定常歩容におけるロボット 1 のトータルの旋回角（鉛直軸回りの旋回角）に応じたマトリクス（回転座標変換のマトリクス）により次回歩容支持脚座標系から見た値に座標変換したものとをそれぞれ式 3 7 a の左辺の初期上体姿勢角、終端上体姿勢角に代入する。また、式 3 7 a, 3 7 b のそれぞれの右辺第 1 項の積分に係る上体姿勢角加速度は、前記図 2 2 の S 5 1 6 で逐次求められたものが用いられる。

そして、式 3 7 a, 3 7 b の初期上体姿勢角速度と、式 3 7 a, 3 7 b の右辺第 2 項の積分に係る Z M P rec（図 2 6 の台形状のパターン）の台形高さをと未知数として（但し、Z M P rec の台形パターンの折れ点の時刻はあらかじめ定める。また、第 1 旋回歩容の Z M P rec の台形高さ acyc1 と第 2 旋回歩容の Z M P rec の台形高さ acyc2 を同一値とする。）、それらの未知数を含む式 3 7 a, 3 7 b の連立方程式を解くことにより求められる初期上体姿勢角速度を新たな初期上体姿勢角速度として決定する。この場合、式 3 7 b の終端上体姿勢角速度は、未知数である初期上体姿勢角速度を、定常歩容の上記トータルの旋回角に応じたマトリクスにより次回支持脚座標系から見た値に座標変換したものである。

ロボット 1 の移動が旋回を含む移動である場合には、上記のようにして、新たな初期上体姿勢角および角速度を決定すればよい。

なお、定常歩容の境界条件を満たすような初期上体姿勢角速度を探索

的に求めることも可能である。

図20のS310の処理を完了した後、図19のS210に進み、生成した歩容（仮定常歩容）の終端上体水平位置・速度を、その瞬間の支持脚に対応する支持脚座標系（図31の $X'''$ ,  $Y'''$ ,  $Z'''$ 座標系）から見た値に変換し、その値を $(X_e, V_{xe})$ とする（ $X_e$ ：終端上体水平位置、 $V_{xe}$ ：終端上体水平速度）。

次いでS212に進み、図示の如く、初期上体水平位置速度 $(X_s, V_{xs})$ と終端上体水平位置速度 $(X_e, V_{xe})$ との差を算出する。この差 $(X_s - X_e, V_{xs} - V_{xe})$ を上体水平位置速度境界条件誤差 $(errx, errvx)$ と呼ぶ。定常歩容では、前記境界条件を満たす必要があるので、 $(X_s, V_{xs})$ と $(X_e, V_{xe})$ とが一致していなければならない。従って、上体水平位置速度境界条件誤差 $(errx, errvx)$ が零またはほぼ零でなければならない。本実施形態では、以下のように、上体水平位置速度境界条件誤差 $(errx, errvx)$ がほぼ零となる $(X_s, V_{xs})$ が探索的に求められる。

次いでS214に進み、算出した上体水平位置速度境界条件誤差 $(errx, errvx)$ が、あらかじめ適宜設定された許容範囲内にあるか否かが判断される。尚、このように上体水平位置速度境界条件誤差の許容範囲を設定する代わりに、初期発散成分 $(X_s + V_{xs} / \omega_0)$ と終端発散成分 $(X_e + V_{xe} / \omega_0)$ との差、および初期収束成分 $(X_s - V_{xs} / \omega_0)$ と終端収束成分 $(X_e - V_{xe} / \omega_0)$ との差がそれぞれある許容範囲内にあるか否か判断するようにしても良い。ただし $\omega_0$ は、前述したように、ある所定の値である。

S214の判断結果がNOであるときにはS216に進む。このS216では、 $(X_s, V_{xs})$ の付近に複数（本実施形態では2つ）の初期値候補 $(X_s + \Delta X_s, V_{xs})$ ,  $(X_s, V_{xs} + \Delta V_{xs})$ が決定

される。ここで、 $\Delta X_s$ 、 $\Delta V_{xs}$ は、それぞれ $X_s$ 、 $V_{xs}$ に対する所定の微小変化量を意味している。そして、これらの初期値候補のそれぞれを上体水平位置速度の初期状態として、前記S208と同様の処理によって定常歩容が歩容パラメータを用いて生成される。さらに、その

5 生成された定常歩容の終端上体位置速度を、その瞬間の支持脚に対応する支持脚座標系（図31の $X'''$ 、 $Y'''$ 、 $Z'''$ 座標系）から見た値に変換した値（ $X_e + \Delta X_{e1}$ 、 $V_{xe} + \Delta V_{xe1}$ ）、（ $X_e + \Delta X_{e2}$ 、 $V_{xe} + \Delta V_{xe2}$ ）が求められる。ここで、（ $X_e + \Delta X_{e1}$ 、 $V_{xe} + \Delta V_{xe1}$ ）は（ $X_s + \Delta X_s$ 、 $V_{xs}$ ）に対応する終端上体位置速度

10 度を意味し、（ $X_e + \Delta X_{e2}$ 、 $V_{xe} + \Delta V_{xe2}$ ）は（ $X_s$ 、 $V_{xs} + \Delta V_{xs}$ ）に対応する終端上体位置速度を意味している。なお、この場合の定常歩容（仮歩容）の生成処理では、上体水平位置速度以外の変数の初期状態（時刻 $T_s$ での状態）は、例えば上体水平位置速度の初期値候補を（ $X_s$ 、 $V_{xs}$ ）とした場合と同一に設定すればよい。S2

15 16ではさらに、前記S210と同様の処理によって、各初期値候補とこれに対応する終端上体位置速度との差、すなわち、各初期値候補（ $X_s + \Delta X_s$ 、 $V_{xs}$ ）、（ $X_s$ 、 $V_{xs} + \Delta V_{xs}$ ）のそれぞれに対応する上体水平位置速度境界条件誤差が求められる。

次いでS218に進み、（ $X_s$ 、 $V_{xs}$ ）およびその付近の初期値候補（ $X_s + \Delta X_s$ 、 $V_{xs}$ ）、（ $X_s$ 、 $V_{xs} + \Delta V_{xs}$ ）のそれぞれに対する上体水平位置速度境界条件誤差を基に、（ $X_s$ 、 $V_{xs}$ ）の次の初期値候補が探索法（擬似ヤコビアン（感度マトリックス）を求め、最急降下法などにより次候補を決定する方法や、シンプレックス法など）により決定される。すなわち、（ $X_s$ 、 $V_{xs}$ ）およびその付近の初期

20 値候補（ $X_s + \Delta X_s$ 、 $V_{xs}$ ）、（ $X_s$ 、 $V_{xs} + \Delta V_{xs}$ ）のそれぞれに対する上体水平位置速度境界条件誤差によって、上体水平位置及び

25



上体水平速度をそれぞれ初期値候補 ( $X_s$ ,  $V_{xs}$ ) から微小変化させたときの、上体水平位置速度境界条件誤差の変化度合いを示す感度マトリックスが求められ、その感度マトリックスに基づいて、上体水平位置速度境界条件誤差をより小さくするような初期値候補 ( $X_s$ ,  $V_{xs}$ )

- 5 が新たに決定される。そして、このように上体水平位置速度の新たな初期値候補 ( $X_s$ ,  $V_{xs}$ ) が決定された後、S 2 0 6に戻る。

- S 2 1 4の判断結果がNOとなる限りは上記した処理 (S 2 0 6 ~ S 2 1 8の処理) が繰り返される。なお、この場合、上体水平位置速度の新たな初期値候補 ( $X_s$ ,  $V_{xs}$ ) に対応する定常歩容の生成処理 (S 2 0 8) におけるS 3 0 0 (図20参照) では、上体姿勢角速度の初期値は、基準上体姿勢角速度の初期値ではなく、上体水平位置速度の前回の初期値候補 ( $X_s$ ,  $V_{xs}$ ) に対応するS 2 0 8の処理におけるS 3 1 0 (図20参照) で決定したものに設定される。そして、S 2 1 4の判断結果がYESになると、繰り返しループ (S 2 0 4) を抜けてS 2 2 0に進む。なお、S 2 0 4の繰り返しループを抜けたときの直前に生成された仮定常歩容が、境界条件を満たす定常歩容として得られることとなる。

- S 2 2 0では、本来の初期時刻0 (今回歩容の終端時刻) における初期上体水平位置速度 ( $X_0$ ,  $V_0$ ) と初期時刻0における初期上体鉛直位置速度 ( $Z_0$ ,  $V_{z0}$ ) と初期時刻0における初期上体姿勢角および角速度が求められる。

- 具体的には、( $X_0$ ,  $V_0$ ) と ( $Z_0$ ,  $V_{z0}$ ) は、前記図21に示した定常歩容瞬時値決定サブルーチンのS 4 0 8およびS 4 1 4において、第2巡回歩容から第2巡回歩容に切り換わった瞬間の時刻、すなわち、  
25 時刻  $k = T_{cyc}$  (時刻  $T_e - T_s$ ) であるときに決定された上体水平位置速度と上体鉛直位置速度とを、それぞれ時刻  $T_{cyc}$  から始まる一步 (すな

わち 2 度目の第 1 旋回歩容) の支持脚に対応する支持脚座標系 (図 3 1  
 の  $X'''$ ,  $Y'''$ ,  $Z'''$  座標系) から見た値に変換した値に決定される。同様  
 に、初期状態姿勢角および角速度は、時刻  $k = T_{cyc}$  (時刻  $T_e - T_s$ ) で  
 あるときに決定された上体姿勢角及び角加速度を、時刻  $T_{cyc}$  から始ま  
 5 る一歩 (すなわち 2 度目の第 1 旋回歩容) の支持脚に対応する支持脚座  
 標系 (図 3 1 の  $X'''$ ,  $Y'''$ ,  $Z'''$  座標系) から見た値に変換した値に決定  
 される。

次いで  $S 2 2 2$  に進み、定常歩容初期発散成分  $q [0]$  が次式から求  
 められる。

10

$$q [0] = X 0 + V 0 / \omega 0 \quad \dots \text{式 4 0}$$

ただし  $\omega 0$  は、発散についての解説で述べたように、ある所定の値であ  
 る。

さらに、 $S 2 2 4$  に進み、定常歩容初期発散成分  $q [0]$  が今回歩容  
 15 支持脚座標系から見た値に変換され、これが  $q'' [0]$  として求められ  
 る。また、初期上体鉛直位置速度 ( $Z 0$ ,  $V z 0$ ) が今回歩容支持脚座  
 標系から見た値に変換され、これが ( $Z 0''$ ,  $V z 0''$ ) として求められ  
 る。

補足すると、( $Z 0''$ ,  $V z 0''$ ) は、第 2 旋回歩容の支持脚座標系  
 20 (図 1 5 の  $X''$ ,  $Y''$ ,  $Z''$  座標系) から見た第 2 旋回歩容終端上体鉛直  
 位置速度に一致している。また、 $q'' [0]$  も第 2 旋回歩容の支持脚座  
 標系 (図 1 5 の  $X''$ ,  $Y''$ ,  $Z''$  座標系) から見た第 2 旋回歩容終端発散  
 成分に一致している。したがって、これらの性質を用いて、( $Z 0''$ ,  $V$   
 $z 0''$ ) および  $q'' [0]$  を算出するようにしても良い。

25 以上により、図 1 2 の  $S 0 2 4$  の処理、すなわち定常歩容の初期状態  
 を求めるサブルーチン処理が終了する。

次いで、図12のS026に進み、今回歩容の歩容パラメータを決定（一部は仮決定）する。S026では、より具体的には、図32に示すフローチャートに従って、以下の処理が行われる。

まず、S600において、今回歩容の足平位置姿勢軌道が定常歩容の足平位置姿勢軌道につながるように、今回歩容の足平軌道パラメータが設定される。

具体的には、今回歩容初期遊脚足平位置姿勢（今回歩容遊脚足平位置姿勢の初期値）は、今回歩容支持脚座標系から見た現在遊脚位置姿勢（前回歩容終端遊脚位置姿勢）に設定される。今回歩容初期支持脚足平位置姿勢（今回歩容支持脚足平位置姿勢の初期値）は、今回歩容支持脚座標系から見た現在支持脚足平位置姿勢（前回歩容終端支持脚足平位置姿勢）に設定される。また、今回歩容終端遊脚足平位置姿勢は、今回歩容支持脚座標系から見た次回歩容支持脚座標系（今回歩容に係わる1歩目の遊脚着床位置姿勢の要求値）に対応して決定される。すなわち、今回歩容終端遊脚足平位置姿勢から遊脚足平22を床に接触させたまま、すべらないように該足平22をその底面のほぼ全面が接地するまで回転させたときの、該足平22の代表点が今回歩容支持脚座標系から見た次回歩容支持脚座標系の原点に合致するように今回歩容終端遊脚足平位置姿勢が決定される。

今回歩容終端では、支持脚足平22は離床して空中にある。支持脚足平22が離床してから後の軌道を決定するために、支持脚足平着地予定位置姿勢を設定する。支持脚足平着地予定位置姿勢は、今回歩容支持脚座標から見た次次回歩容支持脚座標（今回歩容に係わる2歩目の遊脚足平位置姿勢の要求値）に対応して設定される。より具体的には、支持脚足平着地予定位置姿勢は、その位置姿勢から、足平22を床に接触させたまま、すべらないように該足平22をその底面のほぼ全面が床に接地

するまで回転させたときの該足平 2 2 の代表点が今回歩容支持脚座標から見た次次回歩容支持脚座標の原点に合致するように設定される。

今回歩容終端支持脚足平位置姿勢は、現在支持脚位置姿勢（今回歩容初期支持脚足平位置姿勢）から、次回歩容支持脚座標系に対応する足平  
5 着地予定位置姿勢（前記要求パラメータにおける 2 歩目の遊脚側足平着地位置姿勢の要求値）に至る足平位置姿勢軌道を、今回歩容終端まで前記有限時間整定フィルタにより生成することにより求められる。

次いで、S 6 0 2 に進み、今回歩容の基準上体姿勢軌道パラメータが、定常歩容の第 1 旋回歩容や第 2 旋回歩容と同様に決定される。ただし、  
10 今回歩容の基準上体姿勢軌道が前記定常歩容の基準上体姿勢軌道に連続してつながる（今回歩容終端での基準上体姿勢角及び角速度がそれぞれ定常歩容初期の基準上体姿勢角及び角速度に一致する）ように上記パラメータが設定される。なお、本実施形態では、基準上体姿勢は、今回歩容及び定常歩容のいずれでも定常的な鉛直姿勢である。

15 次いで、S 6 0 4 に進み、今回歩容の腕姿勢軌道パラメータが、定常歩容の第 1 旋回歩容や第 2 旋回歩容と同様に決定される。ただし、今回歩容の腕姿勢軌道が前記定常歩容の腕姿勢軌道に連続してつながるように上記パラメータを設定する。なお、ここで決定される腕姿勢軌道パラメータは、定常歩容パラメータの決定（図 1 4 の S 1 0 4）の場合と同様、鉛直軸（あるいは上体体幹軸）まわりの両腕体の角運動量変化に関  
20 すること以外の運動パラメータであり、両腕体の重心位置の軌道を規定するパラメータである。

次いで、S 6 0 6 に進み、今回歩容の床反力鉛直成分軌道パラメータが、定常歩容の第 1 旋回歩容や第 2 旋回歩容と同様、該パラメータにより規定される床反力鉛直成分軌道が前記図 6 のように実質的に連続な  
25 （値がステップ状に飛ばない）軌道になるように設定される。

ただし、床反力鉛直成分軌道パラメータは、今回歩容の全体重心鉛直位置速度と床反力鉛直成分軌道とのいずれもが、前記定常歩容と連続してつながるように決定される。

具体的には、まず、前記図 12 の S 0 2 4 の処理（定常歩容初期状態  
5 の決定処理）で最終的に求めた定常歩容の初期上体鉛直位置速度を今回歩容支持脚座標系から見た値に変換した値（ $Z0''$ ,  $Vz0''$ ）、すなわち、図 19 の S 2 2 4 で求めた（ $Z0''$ ,  $Vz0''$ ）等を基に、例えば前記式 0 4（あるいはロボット 1 のキネマティクスモデル）を用いて、今回歩容支持脚座標系から見た定常歩容の初期全体重心鉛直位置速度が求められる。具体的には、今回歩容支持脚座標系から見た定常歩容の初期全体重心鉛直位置は、S 2 2 4 で求めた定常歩容の上体鉛直位置  $Z0''$  に対応する図 10 のモデルの上体質点鉛直位置と、定常歩容初期の各足平位置を今回歩容支持脚座標系から見た値に変換したものに対応する支持脚側及び遊脚側の脚体質点鉛直位置とを式 0 4 に代入することで求め  
15 られる。また、今回歩容支持脚座標系から見た定常歩容の初期全体重心鉛直速度は、S 2 2 4 で求めた定常歩容の上体鉛直速度  $Vz0''$  に対応する図 10 のモデルの上体質点鉛直速度と、定常歩容初期の各足平鉛直速度を今回歩容支持脚座標系から見た値に変換したものに対応する支持脚側及び遊脚側の脚体質点鉛直速度とを式 0 4 の両辺を微分してなる式に  
20 代入することにより求められる。なお、この初期全体重心鉛直位置速度の算出は、より厳密なモデルを用いて行なうようにしてもよい。

そして、このようにして求めた定常歩容の初期全体重心鉛直位置速度を、前記式 1 3 と下記式 4 1 の終端全体重心鉛直位置速度に代入すると共に、前回の目標歩容瞬時値（より厳密には、前回目標歩容の終端状態  
25 を今回支持脚座標系に変換したもの）の全体重心鉛直位置および速度を、前記式 1 3 と下記式 4 1 の初期全体重心鉛直位置および速度に代入し、

式 1 3 と式 4 1 の関係を満足するように、今回歩容の床反力鉛直成分パターン（より具体的にはパラメータ値）が決定される。ただし、式 1 3 と式 4 1 における積分値は今回歩容の初期から終端までの期間の積分値とする。

5

終端全体重心鉛直速度－初期全体重心鉛直速度  
 ＝（床反力鉛直成分/ロボットの質量）の 1 階積分  
 ＋ 重力加速度の 1 階積分

…式 4 1

10     ただし、重力加速度は負の値とする。

より具体的には、まず、図 6 のような床反力鉛直成分パターンを規定する床反力鉛直成分パラメータ（折れ点の時刻等）のうちの、少なくとも 2 つのパラメータを独立な未知変数として、その未知変数の値を、式 1 3 と式 4 1 とからなる連立方程式を解いて決定する。

15     未知変数とする床反力鉛直成分パラメータには、例えば、図 6 の台形の高さ（床反力鉛直成分のピーク値）と幅（片脚支持期時間）とを選択すれば良い。この場合、図 6 の台形の両側部分の傾きは今回歩容周期等に応じてあらかじめ定めた値とし、あるいは、片脚支持期から空中期に移行する時刻を除く床反力鉛直成分パターンの折れ点の時刻を今回歩容  
 20     周期等に応じてあらかじめ定めた値とする。補足すると、未知変数を 1 つとすると、一般的には式 1 3 と式 4 1 の連立方程式を満足する解が存在しない。

次いで、S 6 0 8 に進み、床反力水平成分許容範囲[Fxmin, Fxmax]（具体的には該床反力水平成分許容範囲のパターンを規定するパラメータ）が、定常歩容の第 1 旋回歩容や第 2 旋回歩容と同様に設定される。  
 25     たとえば図 3 3 に示すようなパターンで床反力水平成分許容範囲が設定

される。本実施形態では、先に S 6 0 6 で決定した床反力鉛直成分パターンに応じて前記式 1 2 に基づいて床反力水平成分許容範囲（詳しくは X 軸方向、Y 軸方向の各軸方向の許容範囲）が設定される。なお、ここで設定する床反力水平成分許容範囲は、確実に摩擦限界内に収まるように設定することが望ましい。

次いで、S 6 1 0 に進み、今回歩容の Z M P 軌道（具体的には Z M P 軌道を規定するパラメータで、軌道の折れ点の時刻や位置）が、定常歩容の第 1 旋回歩容や第 2 旋回歩容と同様、安定余裕が高くかつ急激な変化をしないように、前記図 7 に示すごとく設定される。ただし、今回歩容の Z M P 軌道が前記定常歩容の Z M P 軌道に連続してつながるように上記パラメータを設定される。つまり、今回歩容終端における Z M P の位置が定常歩容初期の Z M P 位置に一致するように、Z M P 軌道パラメータが決定される。この場合、走行歩容では、片脚支持期における Z M P 軌道の折れ点の時刻や位置の設定の仕方は、前述した定常歩容の Z M P 軌道パラメータの設定の仕方と同様でよい。そして、空中期における目標 Z M P 軌道が、空中期開始時から、定常歩容初期の Z M P 位置まで、直線的に連続して変化するように Z M P 軌道パラメータを設定すればよい。

なお、S 6 1 0 で決定される今回歩容の Z M P 軌道パラメータは、仮決定されただけであり、後述するように修正される。そこで、上記のごとく設定した今回歩容の Z M P 軌道を、以降、今回歩容の仮目標 Z M P 軌道と呼ぶこととする。

最後に、S 6 1 2 に進み、上体姿勢角復元期間  $[T_a, T_b]$  が設定される。上体姿勢角復元開始時刻  $T_a$  は、定常歩容の第 2 旋回歩容における  $T_m$  に相当し、上体姿勢角復元終了時刻  $T_b$  は、定常歩容の第 2 旋回歩容における  $T_{s2}$  に相当するものである。これらの時刻  $T_a, T_b$  の設定の

仕方は、それぞれ  $T_m$  および  $T_{s2}$  の設定の仕方と同様である。

図 1 2 の説明に戻って、上記のごとく S 0 2 6 に示す処理（今回歩容の歩容パラメータ決定処理）を行って後、次いで S 0 2 8 に進み、今回歩容の歩容パラメータ（ZMP 軌道パラメータ）が修正される。この処理では、上体位置姿勢軌道を定常歩容に連続させ、もしくは近づけるべく ZMP 軌道パラメータが修正される。

図 3 4 はその処理を示すサブルーチン・フロー・チャートである。

まず S 7 0 0 を経て S 7 0 2 に進み、仮目標 ZMP パターンとその他の今回歩容パラメータを基に、今回歩容終端時刻までの仮今回歩容が仮生成される。

S 7 0 2 では、図 3 5 に示すフローチャートに従って、以下の処理が行われる。

以下説明すると、S 8 0 0 において、諸々の初期化が行われる。具体的には、仮歩容生成用時刻  $k$  に 0 が代入される。また、前回目標歩容の終端状態（より具体的には、上体水平位置速度、上体鉛直位置速度、上体姿勢角及びその角速度、目標足平位置姿勢、目標腕姿勢などの歩容状態の終端値）を今回支持脚座標系に変換したものを、今回歩容初期状態とする。

次いで、S 8 0 2 を経て S 8 0 4 において、仮歩容生成用時刻  $k$  が今回歩容終端時刻  $T_{curr}$  以前であるか否か（ $k \leq T_{curr}$  であるか否か）が判断され、その判断結果が YES ある場合には、S 8 0 6 の今回歩容瞬時値決定サブルーチンに進み、今回歩容の時刻  $k$  の瞬時値が決定される。次いで S 8 0 8 に進み、仮歩容生成用時刻  $k$  が  $\Delta k$  だけ増加され、S 8 0 4 に戻る。

S 8 0 4 の判断結果が NO である場合には、図 3 5 に示すフローチャートの処理が完了する。



以上の処理により、仮の今回歩容が初期から終端まで生成される。

S 8 0 6 の歩容瞬時値決定サブルーチンでは、図 3 6 に示す処理が行われる。以下にこれを説明する。

まず S 9 0 0 において、今回歩容パラメータの床反力鉛直成分軌道パラメータを基に、図 6 に示した目標床反力鉛直成分の時刻  $k$  における値（今回値）が求められる。次いで、S 9 0 2 において、今回歩容パラメータの Z M P 軌道パラメータを基に、図 7 に示す目標 Z M P 軌道（仮目標 Z M P 軌道）の時刻  $k$  における値（今回値）を求める。

次いで S 9 0 4 に進み、今回歩容パラメータ（足平軌道パラメータ、基準上体姿勢軌道パラメータおよび腕姿勢軌道パラメータ）を基に、時刻  $k$  における目標両足平位置姿勢、基準上体姿勢および目標腕姿勢の値（今回値）がそれぞれ求められる。ただし、目標腕姿勢に関しては、腕全体重心位置は決定されるが、鉛直軸（または上体体幹軸）まわりの角運動量を変化させる運動自由度は、未だ決定されていない。なお、定常歩容の場合と同様、今回歩容の目標足平位置姿勢軌道及び床反力鉛直成分軌道は、それぞれ、図 3 2 のフローチャートで決定した足平軌道パラメータ、床反力鉛直成分軌道パラメータに応じて互いに独立的に決定される。

次いで S 9 0 6 に進み、S 9 0 0 で求めた目標床反力鉛直成分の今回値を満足する（ロボット 1 の鉛直方向の慣性力と重力との和を目標床反力鉛直成分に釣り合わせる）ような時刻  $k$  における全体重心鉛直位置が算出される。この算出は、具体的には前記図 2 1 の S 4 0 6 と同様の処理により行なわれる。

次いで S 9 0 8 に進み、上記の如く求めた全体重心鉛直位置を満足する上体鉛直位置の今回値が算出される。この算出は、具体的には、前記図 2 1 の S 4 0 8 と同様の処理により行なわれる。

次いでS 9 1 0に進み、前記図 3 2のS 6 0 8で決定した床反力水平成分許容範囲のパラメータに基づいて、図 3 3に示す床反力水平成分許容範囲[Fxmin, Fxmax]の時刻kにおける値（今回値）が求められる。

次いでS 9 1 2に進み、目標ZMPを満足する（目標ZMP回りに発生するモーメント水平成分が0になる）ように、今回仮歩容の上体水平加速度と上体姿勢角加速度が決定される。ただし、これらの加速度は、床反力水平成分  $F_x$  が[Fxmin, Fxmax]を越えないように決定される。この処理は、図 2 1のS 4 1 2の詳細を示す図 2 2のフローチャートの処理とは若干異なる。

10 S 9 1 2では、具体的には、図 3 7のフローチャートに示す処理が行われる。図 3 7のフローチャートでは、まずS 1 0 0 0において、時刻kが前記図 3 2のS 6 1 2で設定した上体姿勢角復元期間[Ta, Tb]にあるか否かが判断される。

この判断結果がNOである場合（床反力水平成分許容範囲が0もしくは狭い場合）には、S 1 0 0 2からS 1 0 1 4までの処理が実行される。S 1 0 0 2からS 1 0 1 4までの処理は、前述の図 2 2のS 5 0 4からS 5 1 6までの処理と同じであるので、説明を省略する。

S 1 0 0 0の判断結果がYESである場合には、S 1 0 1 6に進み、上体姿勢復元モーメントZMP換算値パターンZMPrecが設定される。20 この場合、定常歩容の生成に係わる前記図 2 2のS 5 1 8と異なり、ZMPrecは、一定値0のパターン（すなわち図 2 6に示す台形パターンの高さが0であるパターン）に設定される。次に、S 1 0 1 8からS 1 0 2 6までの処理が行われる。S 1 0 1 8からS 1 0 2 6までの処理は、前記図 2 2のS 5 2 0からS 5 2 8までの処理と同じであるので説明を省略する。25 なお、S 1 0 1 6～S 1 0 2 6の処理では、上体姿勢復元モーメントZMP換算値ZMPrecの瞬時値は常に0になるので、S 1 0

20で求められる上体回転モードの上体姿勢角加速度 $\beta$ も0になる。従って、 $\beta = 0$ として、S1022、S1024及びS1026の処理のみを行なうようにしてもよい。S1000の判断結果がYESである場合、すなわち、上体姿勢角復元期間[Ta, Tb]では、上記のように $\beta =$   
5 0となることから、S912の処理では、上体姿勢角復元期間[Ta, Tb]の期間（床反力水平成分許容範囲が十分に大きい期間）で、定常歩容生成の場合と異なり、上体姿勢角速度の復元方向への上体姿勢変化の運動軌道は生成されないこととなる。

○  
10 なお、本実施形態では、基準上体姿勢が鉛直姿勢で、基準上体姿勢による上体姿勢角加速度が0であるため、上記の如く求めた上体回転モードの角加速度 $\beta$ をS912の処理で決定される上体姿勢角加速度とした。但し、基準上体姿勢が変化するように該基準上体姿勢軌道パラメータを設定した場合には、上記の如く求めた上体回転モードの角加速度 $\beta$ と基準上体姿勢角加速度の和をもって、S912の処理で決定される上体姿  
15 勢角加速度とすべきである。

以上のごとく図36のS912の処理を完了した後、次いでS914に進み、上記S912で求めた上体水平加速度を逐次積分する（今回歩容初期（時刻  $k=0$ ）から現在時刻  $k$  まで累積加算する）ことによって上体水平速度が求められ、さらにその上体水平速度を逐次積分する（今回  
20 歩容初期（時刻  $k=0$ ）から現在時刻  $k$  まで累積加算する）ことによって、上体水平位置（今回値）が求められる。また、上記S912で求めた上体姿勢角加速度を逐次積分する（今回歩容初期（時刻  $k=0$ ）から現在時刻  $k$  まで累積加算する）ことによって、上体姿勢角速度が求められ、さらにその上体姿勢角速度を逐次積分する（今回歩容初期（時刻  $k=0$ ）から  
25 現在時刻  $k$  まで累積加算する）ことによって、上体姿勢角の今回値が求められる。このS914の処理は図21のS414と同様の処理であ

る。

以上のごとく図35のS806の今回歩容瞬時値決定サブルーチンが  
実行され、次いでS808に進み、歩容生成用時刻  $k$  の値が歩容生成  
インターバル  $\Delta k$  だけ増加される。次いでS804に戻り、S804に  
5 示す条件が成立している限り、S806とS808の処理が繰り返され  
る。そして、S804に示す条件が成立しなくなったら、すなわち終端  
まで仮今回歩容の生成が完了したら、図34のS704に進む。

S704では、上記のごとくS702で求めた今回歩容終端での上体  
水平位置速度 ( $X_e$ ,  $V_{xe}$ ) から、終端発散成分  $q_0[k]$  ( $k=T_{curr}$ )  
10 が図示の式(前記式10)を用いて求められる。

次いでS706に進み、今回歩容終端発散成分  $q_0[k]$  と定常歩容初期  
発散成分  $q''$  (図19のS224で求めたもの) との差である終端発散  
成分誤差  $errq$  が図示の式を用いて求められる。さらに、S708に進  
んで、その求めた終端発散成分誤差  $errq$  が許容範囲内(0近傍の範  
15 囲)にあるか否か判断する。

S708の判断結果がNOであるときはS710に進み、 $a = \Delta a$   
( $\Delta a$ は所定の微小量)とし、図38の関係に従って現在の仮目標ZMP  
パターンに台形状の修正を加えた目標ZMPを基に、前記S702と  
同様に、終端までの仮今回歩容を計算する。ここで、図38を参照して、  
20  $a$ は、今回歩容終端発散成分を定常歩容初期発散成分にできるだけ一致  
させる(今回歩容の上体水平位置姿勢軌道を定常歩容の上体水平位置姿  
勢軌道に近づける)ために、仮目標ZMPを修正するための台形パター  
ンの高さである。この場合、本実施形態では、仮目標ZMPの修正は、  
支持脚足平22の底面のほぼ全面が接地する期間(足底全面接地期間)、  
25 すなわち、床反力水平成分許容範囲が十分に広いものとなる期間におい  
て行なうようにしており、上記台形パターンの折れ点の時刻は、足底全

面接地期間における仮目標ZMPの折れ点の時刻に合わせて設定されている。なお、S710で $a = \Delta a$ とするのは、現在の仮目標ZMP軌道を上記台形パターンによって微小量、修正したときの前記終端発散成分誤差  $errq$  の変化を観測するためである。

5      上記のようにS710にて、 $a = \Delta a$ として仮目標ZMP軌道を修正したときの仮今回歩容を終端まで生成した後、さらにS712に進み、S710で求めた仮今回歩容終端での上体水平位置速度 ( $X_{e1}$ ,  $V_{xe1}$ ) を基に、この仮今回歩容における終端発散成分  $q1[k]$  が図示の式 (前記式10) を用いて求められる。

10      尚、S710において $\Delta a$ は、本実施形態では、適宜に設定される微小量の定数としたが、以下に説明する繰り返し演算によって終端発散成分誤差  $errq$  が小さくなるにつれて $\Delta a$ を減少させるように該 $\Delta a$ を設定するようにしても良い。ただし、定数にしておいても、数回の繰り返し演算で終端発散成分誤差  $errq$  を許容範囲内に収めることができる。

15      次いでS714に進み、パラメータ感度  $r$  ( $\Delta a$ に対する終端発散成分誤差の変化の割合) が図示の式から求められる。さらに、S716に進み、 $a = -errq / r$ 、すなわちS706で求めた終端発散成分誤差  $errq$  を、S714で求めたパラメータ感度  $r$  で割った値を高さ  $a$  とする台形パターンの修正量を図38の関係に従って仮目標ZMPパターン  
20      に加えることにより、仮目標ZMPパターンが修正される (新たな仮目標ZMPパターンが決定される)。

次いでS702に戻る。そして、S708の判断結果がNOである限りは、上記したS702～S716の処理が繰り返され、S708の判断結果がYESになったときには、その繰り返しループ (S700) を  
25      抜けてS718に進む。

S718では、仮今回歩容の終端上体姿勢角と定常歩容の初期上体姿

勢角との差、および仮今回歩容の終端上体姿勢角速度と定常歩容の初期上体姿勢角速度との差などを基に、今回歩容の上体姿勢角が定常歩容の上体姿勢角に近づくように、今回歩容の上体姿勢復元モーメントZMP換算値（ZMP<sub>rec</sub>）のパターンが決定される。ここで決定するZMP<sub>rec</sub>は、後述する今回歩容瞬時値の生成処理で、床反力水平成分許容範囲が十分に大きいものとなる期間（片脚支持期内の期間）において、上体姿勢角軌道を定常歩容につながらせる（近づける）ように上体姿勢角加速度を発生させても、今回歩容終端発散成分と定常歩容初期発散成分との一致性（S708の条件）を維持できるように、仮目標ZMPを修正するためのものである。

このZMP<sub>rec</sub>は、前記定常歩容生成処理で説明したものと同様に台形状のパターンであり、具体的には次のように決定される。すなわち、図26に示したZMP<sub>rec</sub>の台形パターンにおいて、台形の頂点（折れ点）の時刻は既知とする（より具体的には台形の折れ点の時刻を目標ZMPの折れ点時刻に合わせる）と共に、台形高さを未知数とし、以下のようにZMP<sub>rec</sub>の台形高さ（パラメータ）が求められる。ただし、S718では図26におけるT<sub>m</sub>およびTs2をそれぞれTa、Tbに置き換えるものとする。

上記のように上体姿勢復元モーメントZMP換算値パターンの未知パラメータがひとつの場合には、今回歩容の終端において上体姿勢角と上体姿勢角速度の両方を定常歩容に連続につなげることが一般的にはできない。そこで、本実施形態では、複数歩に渡って徐々に、生成される歩容の状態が定常歩容の状態に近づけるように、未知パラメータを決定することとする。

補足すると、1歩容の中でのZMP<sub>rec</sub>パターンを複雑にし、未知パラメータを2つ以上にして、今回歩容の終端において上体姿勢角と上体

姿勢角速度との両者を定常歩容に連続につなげて良いが、ZMP<sub>rec</sub> パターンがジグザグに大きく変動し過ぎる恐れがある。

以下では、算出原理を説明した後、算出手順を説明する。

前述のごとくS702でZMP<sub>rec</sub> パターンの台形高さを0として求めた仮今回歩容の終端上体姿勢角と定常歩容の初期上体姿勢角との差を求め、これを $\theta_{err}$ とする。また、仮今回歩容の終端上体姿勢角速度と定常歩容の初期上体姿勢角速度との差を求め、これを $v\theta_{err}$ とする。

ここで、ZMP<sub>rec</sub> パターンの台形高さをある値  $b_{curr}$  として今回歩容が生成され、引き続いて、今回歩容と同様のアルゴリズムによって第1巡回歩容が生成されると想定する。ただし、第1巡回歩容の上体姿勢復元モーメントZMP換算値ZMP<sub>rec</sub> パターンは、図22のS518において求められた第1巡回歩容のZMP<sub>rec</sub> パターン（高さが前記  $acycl$  である図26の台形パターン）とある値  $b1$  の和であるとする。

このようにして生成された歩容をZMP<sub>rec</sub> 修正歩容と呼び、その終端（第1巡回歩容の終端）上体姿勢角と角速度をそれぞれ $\theta_1$ 、 $v\theta_1$ とする。

S024における定常歩容の初期状態を求めるサブルーチンの処理が完了した時点で求められた本来の定常歩容（最終的にS310の式30、式31によって決定された定常歩容初期上体姿勢角および角速度を初期値とし、ZMP<sub>rec</sub> パターンをS518において求められたパターン（高さが  $acycl$  である図26の台形パターン）とした場合の定常歩容）の第1巡回歩容終端上体姿勢角と角速度をそれぞれ $\theta_{1org}$ 、 $v\theta_{1org}$ とする。

ここで、 $\Delta\theta_1$ 、 $\Delta v\theta_1$ を次のように定義する。

25

$$\Delta\theta_1 = \theta_1 - \theta_{1org}$$

…式50

$$\Delta v\theta 1 = v\theta 1 - v\theta 1org \quad \dots \text{式 5 1}$$

5  $\Delta\theta 1$  および  $\Delta v\theta 1$  は、ZMPrec 修正歩容と本来の定常歩容を第 1 旋回歩容の終端まで生成した時点において、両者間における上体姿勢角の差及び角速度の差を意味する。もし、 $\Delta\theta 1$  および  $\Delta v\theta$  が 0 になれば、ZMPrec 修正歩容に引き続いて、今回歩容と同様のアルゴリズムによって、ZMPrec パターンの台形高さを前記 acyc2 として第 2 旋回歩容が生成されると、この歩容は、本来の定常歩容に一致する。

したがって、 $\Delta\theta 1$  および  $\Delta v\theta 1$  が 0 となる今回歩容台形高さ bcurr、  
10 第 1 旋回歩容台形高さ b1 を求め、求めた bcurr を今回歩容の台形高さとして最終的に決定すれば良い。

ところで、ロボット 1 の上体姿勢角に関する動力学モデルが図 10 に示すフライホイール FH のような線形特性を持つことから、 $\Delta\theta 1$  および  $\Delta v\theta$  は、今回歩容台形高さ bcurr、第 1 旋回歩容台形高さ b1、仮今回歩容の終端上体姿勢角と定常歩容の初期上体姿勢角の差  $\theta err$ 、仮今回歩容の終端上体姿勢角と定常歩容の初期上体姿勢角速度の差  $v\theta err$  と以下の関係を持つ。  
15

$$\Delta\theta 1 = c11 * bcurr + c12 * b1 + \theta err + e1 * v\theta err \quad \dots \text{式 5 2}$$

$$\Delta v\theta 1 = c21 * bcurr + c22 * b1 + e2 * v\theta err \quad \dots \text{式 5 3}$$

20

ただし、c11、c12、c21、c22、e1、e2 は、今回歩容、第 1 旋回歩容の歩容周期、上体姿勢復元モーメント ZMP 換算値 ZMPrec パターンのパラメータ（特に時間に関するパラメータ）などによって一義的に決定される係数である。

25 以上の原理に基づき、算出手順として、まず、仮今回歩容と定常歩容との境界での上体姿勢角の差  $\theta err$  と角速度の差  $V\theta err$  が求められる。



次いで、式 5 2, 5 3 の係数である  $c_{11}$ ,  $c_{12}$ ,  $c_{21}$ ,  $c_{22}$ ,  $e_1$ ,  $e_2$  が、今回歩容、第 1 巡回歩容の歩容周期、上体姿勢復元モーメント ZMP 換算値 ZMP<sub>rec</sub> パターンのパラメータ（特に時間に関するパラメータ）などを基に求められる。

- 5 次いで式 5 2、式 5 3 の右辺が 0 となるように今回歩容台形高さ  $b_{curr}$ 、第 1 巡回歩容台形高さ  $b_1$  が決定される。すなわち、式 5 2、式 5 3 の右辺を 0 とした連立方程式を解くことによって、 $b_{curr}$ ,  $b_1$  が求められる。

- 10 最後に、今回歩容の上体姿勢復元モーメント ZMP 換算値 (ZMP<sub>rec</sub>) の台形パターンの台形高さが、上記求めた今回歩容台形高さ  $b_{curr}$  に設定される。

- 15 次いで S 7 2 0 に進み、現在の仮目標 ZMP パターン (S 7 0 0 の繰り返しループを抜けたときの仮目標 ZMP パターン) に、S 7 1 8 で上記のように求めた上体姿勢復元モーメント ZMP 換算値パターンを加算してなるパターンが今回歩容の目標 ZMP パターンとして決定される。なお、この処理は、S 7 1 0 において  $\Delta a$  の高さの台形パターンを仮目標 ZMP パターンに加える処理と同様である。

以下に仮目標 ZMP パターンに上体姿勢復元モーメント ZMP 換算値パターンを加算した理由を述べる。

- 20 S 7 0 0 のループにおいて生成される仮今回歩容は、前述の如く、上体姿勢復元モーメント ZMP 換算値 ZMP<sub>rec</sub> を 0 (ZMP<sub>rec</sub> の台形パターンの高さパラメータを 0) にして生成される。このようにして S 7 0 0 のループで最終的に生成された仮今回歩容では、その上体位置速度は、定常歩容に連続し、もしくは近づくが、上体姿勢角は、定常歩容  
25 の上体姿勢角からずれ、場合によっては発散してしまう。

S 7 1 8 で求められた上体姿勢復元モーメント ZMP 換算値パターン

は、上体姿勢角の定常歩容に対するずれを0に近づけるための上体姿勢角加速度を発生させるものである。

しかし、S700のループで最終的に得られた仮目標ZMPパターンを修正することなく、S718で求められた上体姿勢復元モーメントZMP換算値パターンに応じた上体姿勢角加速度を発生させると、動力学的平衡条件（ロボットの重力と慣性力の合力が目標ZMPに作用するモーメントが鉛直成分を除いて0になること）を満足させるために、上体水平位置軌道を前記仮今回歩容の上体水平位置軌道からずらさざるを得なくなる。そこで、本実施例では、上体水平位置軌道をS700のループで最終的に得られるものからずらさなくて済むように、ZMP<sub>rec</sub>によって仮目標ZMPパターンを修正することとした。

前記仮今回歩容の運動に加えて、S718で求めた上体姿勢復元モーメントZMP換算値パターンに対応する上体姿勢角加速度を発生させると、ZMP（運動によって発生する重力と慣性力の合力の鉛直成分を除くモーメントが0になる点）は上体姿勢復元モーメントZMP換算値だけずれる。したがって、逆に、仮目標ZMPパターンに上体姿勢復元モーメントZMP換算値パターンを加算したパターンを目標ZMPパターンとして、S718で求めた上体姿勢復元モーメントZMP換算値パターンに対応する上体回転モードの上体姿勢角加速度を発生させながら、目標ZMPパターンを満足する今回歩容を生成すれば、前記仮今回歩容と同じ上体並進運動となる。

以上が、仮目標ZMPパターンに上体姿勢復元モーメントZMP換算値パターンを加算したパターンを目標ZMPパターンとした理由である。

図12に戻って、上記のごとくS028において今回歩容パラメータを修正した後、S029に進み、目標ZMPまわりの床反力モーメント（より詳しくは床反力モーメントの水平成分）の許容範囲を規定するパ

ラメータが決定される。なお、床反力モーメントを、床反力鉛直成分で割ったものが、ZMP（床反力中心点）の目標ZMPからのずれ量を表すものとなる。従って、床反力モーメント許容範囲を、床反力鉛直成分で割ることによって、床反力中心点に変換したZMP許容範囲（床反力中心点許容範囲）のパラメータを設定するようにしてもよい。

S029で決定する床反力モーメント許容範囲は、前記複合コンプライアンス動作決定部104の制御処理（コンプライアンス制御）によって制御される目標ZMPまわりの実床反力モーメントの許容範囲である。この床反力モーメント許容範囲について以下に説明する。

- 10 複合コンプライアンス動作決定部104の処理によるコンプライアンス制御は、目標ZMPまわりに発生する床反力モーメントがコンプライアンス制御用目標床反力モーメントになるように足平22の位置姿勢を制御する。コンプライアンス制御が目標通りに忠実に作動すると、実床反力中心点は、目標床反力モーメントを鉛直床反力で割った値を目標ZMPに加えた点もしくは目標ZMPから減じた点にずれる。実床反力中心点は、いわゆる支持多角形で表されるZMP存在可能範囲（厳密な表現では、実床反力作用点の存在可能範囲）を越えることができないが、
- 15 実床反力中心点が越えそうになると（すなわちZMP存在可能範囲の境界に近づき過ぎると）、足平22の本来の接地感を低下させたり、足平22の底面が浮いてしまうような不具合が発生する。

- 床反力モーメント許容範囲は、このような不具合を防止するために、コンプライアンス制御の目標床反力モーメントに制限を加えるものである。厳密には、床反力モーメント許容範囲は、後述の第2実施形態で説明する復元条件1のために設定するが、本実施形態のように前記式d2
- 25 7を満足させる場合には、コンプライアンス制御用目標床反力モーメントが床反力モーメント許容範囲を越えないように制限することと等価に

なる。

したがって、床反力モーメント許容範囲は、これを床反力鉛直成分で割ることによって求められる床反力中心点許容範囲が、ZMP存在可能範囲に含まれるように決定されることが望ましい。

- 5 より具体的には、床反力中心点許容範囲（ZMP許容範囲）は、支持多角形に応じて決定されるべきで、一般的には、複雑な形状になるが、ここでは、演算を簡素化するために、基本的には床面上の長方形の領域とする。すなわち、床反力中心点許容範囲、ひいては、これを床反力モーメントに変換してなる床反力モーメント許容範囲が、前後方向（X軸  
10 方向）成分と左右方向（Y軸方向）成分とでそれぞれ独立に範囲が設定される。

- 例えば、支持多角形と目標ZMPが図39のような状況にある場合には、図示のごとく、ZMP許容範囲は支持多角形に内包されるように設定される。また同時に、ZMP許容範囲は目標ZMPを内包するように  
15 設定される。なお、図39の例での支持多角形は、歩行歩容（歩行歩容に関する具体的な歩容生成については後に補足説明を行なう）における両脚支持期のものであり、両端の長方形部分が各脚体2の足平22の位置を表しており、右足平22はつま先が接地、左足平22は踵が接地しているものとする。

- 20 歩行歩容あるいは前記図5の走行歩容における片脚支持期では、支持多角形は、支持脚足平22の接地面（床面との接触面）である。この場合においては、ZMP許容範囲は、目標ZMPを内包しつつ、該支持多角形に内包され、もしくは、その支持多角形とほぼ一致するように設定される。また、前記図5の走行歩容の空中期では、ZMP許容範囲は、  
25 例えば目標ZMPを中心として、X軸、Y軸両方向に幅が0の領域、すなわち、目標ZMPそのものの点（これは面積が0の領域を意味する）

に設定される。

図 1 2 に戻って、上記のごとく S 0 2 9 において床反力モーメント許容範囲を決定した後、あるいは S 0 1 6 の判断結果が NO である場合には、S 0 3 0 に進み、今回歩容瞬時値が決定される。S 0 3 0 では、目標 Z  
5 M P まわりに前記式 d 2 6 に従って決定されるモデル操作床反力モーメントが発生するように歩容瞬時値が決定される。

具体的には、図 4 0、図 4 1 のフローチャートにしたがって歩容瞬時値が決定される。すなわち、S 0 3 0 では、まず、図 4 0 の S 1 0 0 0 から S 1 0 1 0 までの処理が実行される。これらの S 1 0 0 0 から S 1  
10 0 1 0 までの処理は、前述した図 3 6 の S 9 0 0 から S 9 1 0 までの処理と全く同一である。

次いで、S 1 0 1 1 に進み、前記図 1 2 の S 0 2 9 で決定した床反力モーメント許容範囲パラメータを基に、床反力モーメント許容範囲の瞬時値（現在時刻  $t$  の今回値）が求められる。この求められた床反力モー  
15 メント許容範囲は、前記補償全床反力モーメント分配器 1 1 0（図 3 参照）に送られる。そして、この分配器 1 1 0 で前記式 d 2 6 により算出されたモデル操作床反力モーメントの今回値（現在時刻  $t$  の値）が歩容生成装置 1 0 0 に与えられる。

次いで、歩容生成装置 1 0 0 の処理は、S 1 0 1 2 に進み、補償全床  
20 反力モーメント分配器 1 1 0 から与えられたモデル操作床反力モーメントが目標 Z M P まわりに発生するように、今回歩容の上体水平加速度と上体姿勢角加速とが決定される。ただし、床反力水平成分  $F_x$  が、前記図 3 2 の S 6 0 8 で決定された床反力水平成分許容範囲  $[F_{x\min}, F_{x\max}]$  を越えないように上体水平加速度および上体姿勢角加速度が決  
25 定される。

言い換えると、慣性力と重力との合力が目標 Z M P まわりに作用する

モーメントがモデル操作床反力モーメントの符号を反転したモーメントになるように、今回歩容の上体水平加速度と上体姿勢角加速とが決定される。ただし、慣性力水平成分の符号を反転した力が床反力水平成分許容範囲[Fxmin, Fxmax]を越えないように上体水平加速度および上体姿勢角加速5 度速度が決定される。

S 1 0 1 2 では、具体的には、図 4 1 に示すフローチャートに従って、上体水平加速度と上体姿勢角加速とが決定される。これを説明すると、まず S 1 1 0 0 において、現在時刻  $t$  が前記図 3 3 の S 6 1 2 の処理に関して説明した上体傾斜角復元期間[Ta, Tb]にあるか否か、すなわち、10 床反力鉛直成分が十分に大きく、床反力水平成分が十分に大きく発生することができる期間であるか否かが判定される。

S 1 1 0 0 の判断結果が NO である場合には、S 1 1 0 2 に進み、仮に上体並進モードの運動をさせた場合に、今回時刻  $t$  の目標 ZMP まわりにモデル操作床反力モーメントが発生するために必要な上体水平加速15 度  $\alpha_{tmp}$  を求める。この  $\alpha_{tmp}$  は、例えば前記図 1 0 の動力学モデルに係わる前記式 0 3 を用いて求められる。より具体的には、例えば、現在時刻  $k$  までに求められた目標足平位置姿勢の時系列値を用いて、現在時刻  $k$  における支持脚質点 2 m 及び遊脚質点 2 m の加速度が求められると共に、現在時刻  $k$  (今回) の目標足平位置姿勢を用いて支持脚質点 20 m 及び遊脚質点 2 m の位置が求められる。また、現在時刻  $k$  (今回) の目標床反力鉛直成分を用いて現在時刻  $k$  の目標全体重心鉛直位置が求められ、支持脚質点 2 m 及び遊脚質点 2 m の鉛直位置と目標全体重心鉛直位置とから上体質点 2 4 m の鉛直位置が求められると共に、現在時刻  $k$  までに求めた目標上体鉛直位置の時系列値を用いて現在時刻  $k$  における25 上体質点 2 4 m の鉛直加速度が求められる。そして、これらの求めた値を前記式 0 3 に代入すると共に、同式 0 3 の  $M_y$  をモデル操作床反力モ

ーメントとすると共に同式 03 の  $d^2\theta_{by}/dt^2$  を 0 にしてなる式を、  
 $d^2X_b/dt^2$  について解くことにより、上体質点水平加速度  $d^2X_b/dt^2$  が  
上体水平加速度  $\alpha_{tmp}$  として求められる。尚、より厳密な動力学モデル  
を用いて、目標 ZMP 回りの床反力モーメントの水平成分をモデル操  
5 作床反力モーメントにするような上体水平加速度  $\alpha_{tmp}$  を探索的に求  
めるようにしてもよい。また、本実施形態では、基準上体姿勢が鉛直姿  
勢で、基準上体姿勢による上体姿勢角加速度が 0 であるため、上体回転  
モードの角加速度を 0 にして上体水平加速度  $\alpha_{tmp}$  を求めるようにし  
た。但し、基準上体姿勢が変化するように該基準上体姿勢軌道パラメー  
10 タを設定した場合で、それにより定まる現在時刻  $k$  における基準上体姿  
勢角加速度が 0 でない場合には、上体回転モードの角加速度をその 0 で  
ない基準上体姿勢角加速度にして、上体水平加速度  $\alpha_{tmp}$  を動力学モ  
デルを用いて求める（例えば式 03 の  $d^2\theta_{by}/dt^2$  を基準上体姿勢角加  
速度に設定して上記と同様に上体水平加速度  $\alpha_{tmp}$  を求める）ように  
15 すればよい。

次いで S1104 から S1114 まで進み、前記図 37 の S1004  
から S1014 までと同一の処理が実行される。

S1100 の判断結果が YES である場合には、S1116 に進み、  
上体姿勢復元モーメント ZMP 換算値 ( $ZMP_{rec}$ ) パターンが設定さ  
20 れる。この S1100 では、 $ZMP_{rec}$  パターンは、図 37 の S101  
6 と異なり、図 34 の S718 で設定した上体姿勢復元モーメント ZM  
P 換算値 ( $ZMP_{rec}$ ) パターンに設定される。

次いで、S1118 および S1120 に進み、図 37 の S1018 お  
よび S1020 と同じ処理が実行される。但し、この場合、 $ZMP_{rec}$   
25 パターンは 0 でないので、S1120 で求められる上体姿勢復元用の上  
体姿勢角加速度  $\beta$  は一般的には 0 にはならない。

次いで、S 1 1 2 2に進み、仮に上体並進モードの運動をさせた場合に今回時刻の目標ZMPまわりにモデル操作床反力モーメントが発生するために必要な上体水平加速度 $\alpha_{tmp}$ が求められる。この処理は、S 1 1 0 2の処理と同様である。

- 5 次いで、S 1 1 2 4およびS 1 1 2 6に進み、図37のS 1 0 2 4およびS 1 0 2 6と同一の処理が実行される。これにより図40のS 1 0 1 2の処理が完了する。

- 10 以上のごとくS 1 0 1 2の処理を行った後、S 1 0 1 4に進み、図36のS 9 1 4と同一の処理が実行され、今回歩容の上体水平位置および上体姿勢角（詳しくはそれらの現在時刻 $t$ における今回値）が決定される。これにより、図12のS 0 3 0の処理が完了する。

- 15 次いでS 0 3 2に進み、スピン力をキャンセルする（ロボット1の腕以外の運動によって目標ZMP回りに発生する床反力モーメント鉛直成分を略零にする）ための腕動作が決定される。具体的には、腕を振らなかった場合の目標ZMPにおける床反力モーメント鉛直成分軌道（厳密には、腕を振らずに歩容を生成した場合において、ロボットの重力と慣性力の合力が目標ZMPに作用するモーメント鉛直成分軌道の各瞬時値の符号を反転したもの）が求められる。すなわち、S 0 3 0の処理によって生成された歩容の運動（これには腕振りの運動は含まれていない）
- 20 の瞬時値に釣り合う目標ZMP（瞬時値）回りの床反力モーメント鉛直成分の瞬時値が求められる。そして、これを、腕振り運動の等価慣性モーメントで割ることにより、スピン力キャンセルに必要な腕振り動作の角加速度が求められる。なお、補足すると、腕の振りが大き過ぎる場合には、等価慣性モーメントよりも大きな値で割れば良い。

- 25 次に、この角加速度を2階積分し、これを積分値が過大になるのを防ぐためのローカットフィルタに通して得た角度を腕振り動作角とする。



ただし、腕振り動作では、左右の腕を前後逆方向に振り、両腕体の重心位置を変化させないようにする。なお、スピン力をキャンセルするための腕振り運動を定常歩容でも生成しておき、これにつながるように、今回歩容における腕振り運動を決定するようにしてもよい。

- 5 次いでS 0 3 4に進み、時刻  $t$  に制御周期  $\Delta t$  を加え、再び、S 0 1 4に戻り、制御周期毎のタイマー割り込みを待つ。

なお、以上説明した目標歩容の生成処理においては、前記図5の走行歩容を例にとって説明したが、ロボット1の歩行歩容を生成する場合でも、上記と同様に、目標歩容を生成できる。この場合には、床反力鉛直成分軌道（1歩分の軌道）は、例えば図42に示すような折れ線状のパターンで設定すればよい。この例では、より詳しくは、歩行歩容用の床反力鉛直成分軌道は、両脚支持期では、床反力鉛直成分の増加側に凸（上に凸）の台形状に設定され、片脚支持期では床反力鉛直成分の減少側に凸（下に凸）の台形状に設定される。この場合、床反力鉛直成分軌道の2つの台形部分の高さ  $C1$ 、 $C2$  等は、次のように決定することが好ましい。すなわち、本願出願人が先に提案した上体高さ決定法（特開平10-86080号公報。より具体的には同公報の図6の手法等）を用いて、ロボット1の脚体2, 2の関節（具体的には膝関節）の変位に関する所定の幾何学的条件（各脚体2, 2が伸び切ることが無いようにするための条件）を満たす上体鉛直位置軌道を基準上体鉛直位置軌道として求めておく。そして、床反力鉛直成分軌道を歩容初期から歩容終端まで2階積分して得られるロボット1の全体重心鉛直位置軌道に対応する上体鉛直位置軌道の形状的な特徴量（例えば最大値と最小値との差）が、上記基準上体鉛直位置軌道の特徴量（例えば最大値と最小値との差）に合致するように、床反力鉛直成分軌道の2つの台形部分の高さ  $C1$ 、 $C2$  を決定する。尚、この場合、走行歩容用の床反力鉛直成分軌道

の設定の場合と同様、歩行歩容用の床反力鉛直成分軌道においても、その1周期内の平均値がほぼロボット1の自重に一致するようにする。

以上のごとく、歩容生成装置100における目標歩容生成処理が行なわれ、目標上体位置姿勢、目標足平位置姿勢、目標腕姿勢、目標ZMP

5 および目標全床反力の瞬時値が逐次決定されて出力される。この場合、目標全床反力は、コンプライアンス制御に必要な成分だけを出力しても良い。なお、目標ZMPは、目標全床反力に含まれるが特に重要であるので、あえて出力として挙げた。また、複合コンプライアンス制御装置（図4の点線で囲った部分）に対しては、モデル操作床反力モーメント  
10 は、目標床反力として出力されない。すなわち、コンプライアンス制御に対しては、目標ZMPまわりの床反力モーメントが0になることを目標とする目標床反力が、歩容生成装置100から出力される。

以上説明した本実施形態の作用1として、目標歩容の運動は、モデル操作床反力モーメントが目標ZMPまわりに発生するように生成されつ  
15 つ、実際のロボット1の床反力には、モデル操作床反力モーメントが付加されないように制御される。したがって、差し引きモデル操作床反力モーメント分だけ、目標歩容の運動と床反力の不平衡（アンバランス）を生じる。このことは、実ロボット1の上体姿勢角と目標歩容の上体姿勢角との差を0に収束させる効果に関して言えば、モデル操作床反力モー  
20 メントの符号を反転した床反力モーメントを実ロボット1に作用させることと等価である。

つまり、モデル操作床反力モーメントを適宜決定することにより、実ロボット1を、修正目標歩容に収束させることができる。つまり、実ロボット1の姿勢を安定化させることができる。

25 作用2として、モデル操作床反力モーメントの符号を反転したモーメントとコンプライアンス制御用目標床反力モーメントとの和がトータル

の復元力になる。すなわち、コンプライアンス制御用目標床反力モーメントとモデル操作床反力モーメントとの差がトータルの復元力になる。

また、作用 3 として、モデル操作床反力モーメントは、ZMP 存在可能範囲を無視していかなる値でも取ることが可能であるので、非常に高い姿勢復元力を発生することができる。

なお、作用 1、2 および 3 は、本願出願人が先に提案した特開平 5 - 3 3 7 8 4 9 号公報の技術と同様である。

また、作用 4 として、床反力水平成分が、床反力水平成分許容範囲を越えないように上体並進モードの上体並進加速度と上体回転モードの上体姿勢角加速度とが決定されるので、走行歩容における支持脚側脚体 2 の離床直前や着床直後など、大きな床反力水平成分を発生できない時期や、摩擦係数の小さい床をロボット 1 が移動する場合においてもロボット 1 のスリップを防止することができる。

また、作用 5 として、床反力の並進力鉛直成分が 0 の時期、すなわち、両脚がいずれも接地していない時期では、床反力水平成分の許容範囲が 0 に設定されることにより、前記した本実施形態のアルゴリズムにより自動的に、上体並進モードに依存せずに上体回転モードに依存した姿勢復元が行われ、床と足底の間の摩擦力に依存せずに姿勢復元が行われる。したがって、この時期（空中期）においても、単に、上体並進モードを修正するだけの方式と異なり、有効に姿勢復元作用が働く。なお、この時には、床反力水平成分が 0 になるように生成されるから、歩容の全体重心水平加速度は 0 となる。

また、作用 6 として、上記したごとく、コンプライアンス制御に対しては、モデル操作床反力モーメントは、目標床反力として出力されない。すなわち、目標 ZMP まわりにモデル操作床反力モーメントを発生させるように歩容生成が行なわれても、コンプライアンス制御に対しては、

目標 ZMP まわりの床反力モーメントが 0 になることを目標とする目標床反力が、歩容生成装置 100 から与えられる。したがって、コンプライアンス制御による床反力制御を妨げず、コンプライアンス制御による床反力制御を適切に行うことができる。より具体的には、足平 22 の本来の接地性が低下したり、足平 22 の底面が浮いてしまうような不具合が発生することを防止または抑制することができる。

なお、後述するように、第 2 実施例以降でも、目標 ZMP まわりのコンプライアンス制御用目標床反力モーメントは、床反力モーメント許容範囲を越えないように決定される。

10 作用 7 として、目標 ZMP まわりに発生するモーメントが 0 になるように生成したとした場合の歩容を元歩容、前記実施形態の如く目標 ZMP まわりに発生するモーメントがモデル操作床反力モーメントになるように生成される歩容を修正歩容と呼ぶと、通常、元歩容と修正歩容は異なる歩容となる。元歩容は定常歩容に漸近するように設定されているので、修正歩容は、通常、定常歩容に漸近しない歩容となる。

15 しかし、今回歩容（修正歩容）の生成が完了した直後に、再び S020 から S028 が実行され、修正歩容の終端状態を新たな初期状態とした新たな今回歩容が、新たに設定される定常歩容に漸近するように、新たな今回歩容パラメータが決定されるので、継続的に（長期的に）安定性が保証された歩容を生成し続けることができる。

ここで、前述した第 1 実施形態と本発明との対応関係を説明しておく。第 1 実施形態は、前記第 1 ～ 15 発明に対応している。この場合、第 1 実施形態では、ロボット 1 の上体姿勢角がロボットの姿勢の状態量に相当し、床反力水平成分が制限対象量に相当し、モデル操作床反力モーメントが目標床反力の修正操作量に相当し、補償全床反力モーメント Mdmd が第 1 要求操作量に相当し、コンプライアンス制御用床反力

モーメントが実床反力操作量に相当する。また、動力学モデルとして、図10のものが用いられ、そのモデルの運動は上体並進モードと上体回転モードを含んでいる。また、歩容パラメータは図12のS028の処理で前回歩容の終端状態に応じて適宜修正される。

5     なお、本実施形態では、補償全床反力モーメント  $M_{dmd}$  が床反力モーメント許容範囲内の値であるときには、モデル操作床反力モーメントは0になるが、このときのモデル操作床反力モーメントを図10の動力学モデルの状態量（例えば動力学モデル上でのロボットの重心位置や、上体質点24mの位置等）に応じて設定するようにしてもよい。

10    次に本発明の第2実施形態を図43～図46を参照して説明する。なお、本実施形態の説明において、第1実施形態と同一構成部分もしくは同一機能部分については前記第1実施形態と同一の参照符号を用いて説明を省略する。

15    本実施形態の概要を説明すると、元歩容と修正歩容が同時に生成される。修正歩容は、実ロボット1の姿勢安定化のために修正されると共に、コンプライアンス制御により姿勢復元に必要な床反力モーメントを発生してもまだ余裕がある（目標ZMPまわりに発生可能な床反力モーメントに余裕がある）場合には、この余裕を用いて、可能な範囲で元歩容に収束するように決定される。

20    本実施形態における制御ユニット26の機能ブロック図を図43に示す。本実施形態では、姿勢安定化制御演算部112が求める補償全床反力モーメント  $M_{dmd}$  は、歩容生成装置100に入力される。そして、この  $M_{dmd}$  を基にモデル操作床反力モーメントとコンプライアンス制御用目標床反力モーメントとを決定する補償全床反力モーメント分配器  
25    110は、歩容生成装置100に組み込まれ、該歩容生成装置100からコンプライアンス制御用目標床反力モーメントが複合コンプライアン

ス動作決定部104に出力される。そして、歩容生成装置100内の補償全床反力モーメント分配器110は後述するように、第1実施形態のものよりも複雑な処理を行う。これ以外の、制御ユニット26の機能的構成は、前記第1実施形態と同一である。

- 5 図44に本実施形態における歩容生成装置100の処理のメインフローチャートを示す。

同図44において、S2010からS2029までは、第1実施形態のメインフローチャート（図12）のS010からS029までの処理と同一の処理が行なわれる。なお、S028（本実施形態ではS2028）のサブルーチンである図35のフローチャートのS800における  
10 初期化においては、今回歩容初期状態は、前回修正歩容（歩容生成装置100が最終的に出力する歩容）の終端状態を今回支持脚座標系に変換したものであり、S2030で決定される元歩容の終端状態は、S800では用いられない。

- 15 S2029の処理を完了した後、あるいはS2016の判断結果がN Oである場合には、S2030に進み、元歩容の瞬時値（時刻tの今回値）が決定される。元歩容は、目標ZMPまわりの床反力モーメントが0になるように生成される歩容である。

この元歩容は、前記第1実施形態の図12のS030のサブルーチン  
20 処理の一部を変更したアルゴリズムによって生成される。すなわち、S030内のサブルーチン処理（詳しくはS030のサブルーチン処理である図40のS1012のサブルーチン処理）である図41のS1102およびS1122において、モデル操作床反力モーメントを0として（目標ZMPまわりの目標床反力モーメントの水平成分を0として）、  
25 上体水平加速度 $\alpha_{tmp}$ が求められる。これ以外の処理は、図12のS030の処理と同一でよい。

次いで、S 2 0 3 1に進み、修正歩容の瞬時値を決定する。なお、修正歩容は、歩容生成装置 1 0 0 から最終的に出力される目標歩容である。

S 2 0 3 1 の処理は、図 4 5 のサブルーチン処理により行なわれ、以下にその詳細を説明する。

- 5     まず S 2 1 0 0 から S 2 1 1 1 までは、第 1 実施形態で説明した図 4 0 の S 1 0 0 0 から S 1 0 1 1 と同一の処理が実行される。

次いで、S 2 1 1 2 に進み、床反力モーメント許容範囲と床反力水平成分許容範囲との条件を満足するように、モデル操作床反力モーメント、コンプライアンス制御用目標床反力モーメント、上体水平加速度および  
10   上体姿勢角加速が決定される。

S 2 1 1 2 の詳細を、その処理を示す図 4 6 のフローチャートを用いて、以下に説明する。

- まず、S 2 2 0 0 において、修正歩容の上体水平位置と元歩容の上体水平位置との差であるモデル間上体水平位置差が求められる。この時点  
15   では、修正歩容の上体水平位置の今回値（時刻  $t$  での値）は未だ求められていない。そこで、S 2 2 0 0 では、修正歩容の上体水平位置の前回値（時刻  $t - \Delta t$  の制御周期で最終的に求められた値）と、元歩容の上体水平位置の前回値（時刻  $t - \Delta t$  の制御周期で S 2 0 3 0 において求められた値）あるいは今回値（時刻  $t$  の制御周期で S 2 0 3 0 において  
20   求められた値）とを用いて、モデル間上体水平位置差が算出される。

- 次いで、S 2 2 0 2 に進み、修正歩容の上体姿勢角と元歩容の上体姿勢角との差であるモデル間上体姿勢角差が求められる。この S 2 2 0 2 では、S 2 2 0 0 のモデル間上体水平位置差の算出処理の場合と同様、修正歩容の上体姿勢角の前回値と、元歩容の上体姿勢角の前回値又は今  
25   回値とを用いてモデル間上体姿勢角差が求められる。

次いで、S 2 2 0 4 に進み、モデル間上体水平位置差を基に、その差

を 0 に収束させるために必要なモデル上体水平位置安定化床反力モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  が決定される。単に修正歩容の上体並進モードの上体水平加速度を発生させる床反力モーメントを元歩容の上体並進モードの上体水平加速度を発生させる床反力モーメントに一致させると、モデル間上体水平位置差は発散する。モデル上体水平位置安定化床反力モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  は、前記上体並進モードによって修正歩容の上体水平位置を元歩容の上体水平位置に戻すよう動作を行った時に、これに伴って発生する床反力モーメントから元歩容の上体並進運動モードの上体水平加速度を発生させる床反力モーメントを減じたモーメントとしての意味を持つ。

具体的には、モデル上体水平位置安定化床反力モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  は、例えば次式のフィードバック制御則によって決定される。この例では、フィードバック制御則として、PD 制御則を用いているが、PID 等、他のフィードバック制御則を用いてもよい。

$$M_{pfdmd} = K_{mp} * \text{モデル間上体水平位置差}$$

$$+ K_{mpv} * \text{モデル間上体水平位置差の時間微分値}$$

……式 d 2 8

但し、 $K_{mp}$ 、 $K_{mpv}$  はフィードバックゲイン（比例ゲイン、微分ゲイン）である。

次いで、S 2 2 0 6 に進み、モデル間上体姿勢角差を基に、その差を 0 に収束させるために必要なモデル上体姿勢角安定化床反力モーメント要求値  $M_{rfdmd}$  が決定される。単に修正歩容の上体回転モードの上体姿勢角加速度を発生させる床反力モーメントを元歩容の上体回転モードの上体姿勢角加速度を発生させる床反力モーメントに一致させると、モ



デル間上体姿勢角差は 0 に収束しない。モデル上体姿勢角安定化床反力モーメント要求値  $Mrfdmd$  は、上体回転モードによって修正歩容の上体姿勢角を元歩容の上体姿勢角に戻すよう動作を行った時に、これに伴って発生する床反力モーメントから元歩容の上体回転モードの上体姿勢角加速度を発生させる床反力モーメントを減じたモーメントとしての意味を持つ。

具体的には、モデル上体姿勢角安定化床反力モーメント要求値  $Mrfdmd$  は、例えば次式のフィードバック制御則によって決定される。この例では、フィードバック制御則として、P D 制御則を用いているが、P I D 等、他のフィードバック制御則を用いてもよい。

$$\begin{aligned} Mrfdmd = & Kmr * \text{モデル間上体姿勢角差} \\ & + Kmr * \text{モデル間上体姿勢角差の時間微分値} \end{aligned}$$

……式 d 2 9

但し、 $Kmr$ 、 $Kmr$  はフィードバックゲイン（比例ゲイン、微分ゲイン）である。

ところで、最終的に決定された修正歩容の上体並進運動モードに伴って発生する床反力モーメントから元歩容の上体並進運動モードの上体水平加速度を発生させる床反力モーメントを減じたモーメントを、モデル上体水平位置安定化床反力モーメントと呼ぶ。また、最終的に決定された修正歩容の上体回転運動モードに伴って発生する床反力モーメントから元歩容の上体回転運動モードの上体姿勢角加速度を発生させる床反力モーメントを減じたモーメントを、モデル上体姿勢角安定化床反力モーメントと呼ぶ。

一方、摂動運動と摂動床反力とには線形性が近似的に成立する、すなわち、異なる摂動運動を元歩容の運動に加えた運動の床反力は、元歩容

の床反力にそれぞれの摂動運動が発生する摂動床反力を加えたものにほぼ一致する。したがって、次式が近似的に成立する。

モデル操作床反力モーメント

$$\begin{aligned} 5 \quad &= \text{モデル上体水平位置安定化床反力モーメント} \\ &+ \text{モデル上体姿勢角安定化床反力モーメント} \end{aligned}$$

……式 d 3 0

したがって、式 d 3 0 が近似的に成立することを考慮しつつ、モデル  
 10 上体水平位置安定化床反力モーメントをモデル上体水平位置安定化床反力モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  に一致またはなるべく近くなるように決定し、かつ、モデル上体姿勢角安定化床反力モーメントをモデル上体姿勢角安定化床反力モーメント要求値  $M_{rfdmd}$  に一致またはなるべく近くなるように決定すれば、修正歩容に適切なモデル操作床反力モーメントを発生させつつ、修正歩容の上体水平加速度と上体姿勢角加速度とを、  
 15 それぞれ元歩容の上体水平加速度と上体姿勢角加速度とに可能な範囲で収束させることができる。

そこで、S 2 2 0 6 の後、S 2 2 0 8 に進み、以下の条件（これらを復元条件と呼ぶ）をできる限り満足するようにモデル上体水平位置安定  
 20 化床反力モーメント（上体並進モードの床反力モーメント）とモデル上体姿勢角安定化床反力モーメント（上体回転モードの床反力モーメント）とを決定する。さらに、上記のモデル上体水平位置安定化床反力モーメントとモデル上体姿勢角安定化床反力モーメントとの定義を満足するように、修正歩容の上体水平加速度と上体姿勢角加速度とを決定する。  
 25 なお、以下に示す復元条件は、番号が小さい条件ほど優先度が高いものとする。つまり相反して両立できない条件がある場合には、番号が小さ

い条件を優先して満足（成立）させる。ただし、復元条件 1 と 2 は必ず満足（成立）させる。

5 復元条件 1) 補償全床反力モーメント  $M_{dmd}$  とモデル操作床反力モーメントの和（これは、前記式 d 2 7 が成立する場合には、コンプライアンス制御用目標床反力モーメントに相当する）が床反力モーメント許容範囲を越えないこと。

復元条件 2) 修正歩容の床反力水平成分が床反力水平成分許容範囲を越えないこと。

10 復元条件 3) モデル上体姿勢角安定化床反力モーメントが、モデル上体姿勢角安定化床反力モーメント要求値  $M_{rfdmd}$  に一致またはできる限り近いこと。この条件は、修正歩容の上体姿勢角が元歩容（当初予定した歩容）の上体姿勢角に収束するための条件である。

15 復元条件 4) モデル上体水平位置安定化床反力モーメントが、モデル上体水平位置安定化床反力モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  に一致またはできる限り近いこと。この条件は、修正歩容の上体水平位置が元歩容（当初予定した歩容）の上体水平位置に収束するための条件である。

復元条件 5) モデル上体姿勢角安定化床反力モーメントおよびモデル上体水平位置安定化床反力モーメントがそれぞれ連続であること。

20

上記のような復元条件 1 ～ 5 を満足するような上体水平加速度、上体姿勢角加速度等を決定する S 2 2 0 8 の処理は具体的には例えば次のように実行される。

25 まず、コンプライアンス制御用目標床反力モーメントを、補償全床反力モーメント  $M_{dmd}$  と、前記モデル上体水平位置安定化床反力モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  と、モデル上体姿勢角安定化床反力モーメント

Mrfdmd との和に仮に一致させたとした場合における該コンプライアンス制御用目標床反力モーメントの仮値 ( $=M_{dmd} + M_{pfdmd} + M_{rfdmd}$ 。

以下、本実施形態の説明ではこれに参照符号 Min を付する) が求められる。この Min は、コンプライアンス制御用目標床反力モーメントの

5 基本的な要求値としての意味をもつ。

さらに、上体並進モードによって  $M_{pfdmd}$  を発生させると共に上体回転モードによって  $M_{rfdmd}$  を発生させると仮定して歩容の運動を生成した場合に前記式 0 2, 0 3 の動力学モデル上で発生する床反力水平成分が仮値  $F_{in}$  として求められる。この  $F_{in}$  は、モデル上体水平位置安

10 定化床反力モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  による床反力水平成分の要求値としての意味をもつ。この床反力水平成分の仮値  $F_{in}$  は、例えば前記第 1 実施形態で説明した図 4 1 の S 1 1 0 2 および S 1 1 0 4 と同様の手法によって求めることができる。より具体的には、式 0 3 の左辺の  $M_y$  を ( $M_{pfdmd} + M_{rfdmd}$ ) に設定する (厳密には  $M_{pfdmd} + M_{rfdmd}$  15 に目標 ZMP まわりの床反力モーメントの基準値を加えたものを  $M_y$  とするのであるが、本実施形態では該基準値は 0 である) と共に、同式 0 3 の右辺の  $J \cdot d^2 \theta_{by} / dt^2$  を  $M_{rfdmd}$  に設定してなる式を  $d^2 X_b / dt^2$  について解くことにより、上体質点 2 4 m の水平加速度、ひいては、上体水平加速度 (これは S 1 1 0 2 の  $\alpha_{tmp}$  に相当する) が求められる。

20 そして、この求めた上体水平加速度を用いて前記式 1 7 に基づき、床反力水平成分の仮値  $F_{in}$  (これは式 1 7 の  $F_{xtmp}$  に相当する) が求められる。

次いで、これらの Min、 $F_{in}$  の組が、床反力モーメント許容範囲 (詳しくは現在時刻  $t$  の制御周期において図 4 5 の S 2 1 1 1 で求めた今回 25 値) と、床反力水平成分許容範囲 (詳しくは現在時刻  $t$  の制御周期において図 4 5 の S 2 1 1 0 で求めた今回値) との組と比較され、これらの

許容範囲の制限を満たすコンプライアンス制御用目標床反力モーメントおよび床反力水平成分の組（詳しくは床反力モーメント許容範囲内に収まるコンプライアンス制御用目標床反力モーメントと床反力水平成分許容範囲内に収まる床反力水平成分との組）が決定される。なお、床反力モーメント許容範囲による制限対象となるのは、厳密には、目標ZMPまわりの床反力モーメントの基準値（基準瞬時値）にコンプライアンス制御用目標床反力モーメントを加えたものであるが、本実施形態では該基準値は0であるため、コンプライアンス制御用目標床反力モーメントが直接的に床反力モーメント許容範囲による制限対象とされる。

- 10      ここで、上記許容範囲の制限を満たすコンプライアンス制御用目標床反力モーメント（以下、これを制限済コンプライアンス制御用目標床反力モーメント  $M_{ltd}$  という）と床反力水平成分（以下、これを制限済床反力水平成分  $F_{ltd}$  という）との組の決定手法は、後述する第3実施形態で図52～図55を用いて詳細に説明する手法と同じである。そこで、
- 15      その手法の詳細は、第3実施形態で詳細に説明することとし、本実施形態における以下の説明では、図52～図55を参照して簡略的に説明する。

- 20      図52～図55のように、床反力モーメントと床反力水平成分とを2軸とする座標平面を想定したとき、床反力モーメント許容範囲及び床反力水平成分許容範囲の組は、図示の長方形の領域（以下、ここでの説明では許容領域という）で表現される。図52のように、 $(F_{in}, M_{in})$  の組（図の白丸点）が上記許容領域内に存在する場合には、図の黒丸点で表される $(F_{ltd}, M_{ltd})$  の組の如く、 $F_{in}$  がそのまま、床反力水平成分許容範囲の制限を満たす床反力水平成分  $F_{ltd}$  として決定されると共に、
- 25       $M_{in}$  がそのまま、床反力モーメント許容範囲の制限を満たすコンプライアンス制御用目標床反力モーメント  $M_{ltd}$  として決定される。

また、図 5 3 ~ 図 5 5 のように、(Fin, Min) の組 (図の白丸点) が許容領域を逸脱している場合には、上記許容領域を満足するように最終的に決定される (Fltd, Mltd) の組から後述する式 e 0 1、式 e 0 2 を用いて求められるモデル上体姿勢角安定化床反力モーメントがモデル  
5 上体姿勢角安定化床反力モーメント要求値 Mrfdmd に一致または最も近いことを優先し、その上で、モデル上体水平位置安定化モーメントがモデル上体水平位置安定化モーメント要求値 Mpfdmd に最も近いように (Mltd, Fltd) の組が決定される。これは前記復元条件 3), 4) を満たすためである。

- 10      このような (Fltd, Mltd) の組は、例えば次のように決定される。  
前記上体並進モードによって発生する床反力モーメント  $\Delta M_p$  と床反力水平成分  $\Delta F_p$  との比 ( $= \Delta M_p / \Delta F_p$ ) を上体並進モード床反力比率  $h$  と言うこととし、図 5 3 ~ 図 5 5 の座標平面上でこの上体並進モード床反力比率  $h$  の傾きを持ち、且つ点 (Fin, Min) を通る直線を想定す  
15      る。なお、上体並進モード床反力比率  $h$  は、前記式 0 6、0 7 に基づいて  $h = Z_b - Z_{zmp}$  (これは上体質点 2 4 m の目標 ZMP からの高さである) によって定まる値である。

- このとき、図 5 3 及び図 5 4 のように、上記の傾き  $h$  の直線と、前記許容領域 (図示の長方形の領域) との交点が存在する場合には、その交  
20      点のうち、点 (Fin, Min) に最も近い交点 (図の黒丸点) に対応する床反力水平成分および床反力モーメントの値が (Fltd, Mltd) として決定される。このように (Fltd, Mltd) の組を決定したとき、後述する式 e 0 1、e 0 2 を用いて求められるモデル上体姿勢角安定化床反力モーメントがモデル上体姿勢角安定化床反力モーメント要求値 Mrfdmd  
25      に一致することが優先され、その上で、モデル上体水平位置安定化床反力モーメントがモデル上体水平位置安定化床反力モーメント要求値

Mpfdmd に最も近いものとなる。なお、この原理の詳細は、後述の第3実施形態で説明する。

また、図55のように、点 (Fin, Min) (図の白丸点) を通る傾き h の直線が前記許容領域と交わらない場合には、その直線と同じ傾き h を持ち、且つ、前記許容領域と交わる直線のうち、点 (Fin, Min) を通る傾き h の直線に最も近い直線と、前記許容領域との交点 (図の黒丸点) に対応する床反力水平成分および床反力モーメントの値が (Fltd, Mltd) として決定される。このように (Fltd, Mltd) の組を決定したとき、後述する式 e 0 1、e 0 2 を用いて求められるモデル上体姿勢角安定化床反力モーメントがモデル上体姿勢角安定化床反力モーメント要求値 Mrfdmd に一致しないものの、該 Mrfdmd に最も近いことが優先され、その上で、モデル上体水平位置安定化床反力モーメントがモデル上体水平位置安定化床反力モーメント要求値 Mpfdmd に最も近いものとなる。なお、この原理の詳細も後述の第3実施形態で説明する。

なお、前記復元条件3)、4)を満たす (Fltd, Mltd) の組は、前記式02、03に基づいて探索的に求めるようにするうことも可能である。

上述のように (Fltd, Mltd) の組を求めた後、前記モデル上体水平位置安定化床反力モーメント、すなわち、上体並進モードで発生すべき床反力モーメントと、前記モデル上体姿勢角安定化床反力モーメント、すなわち上体回転モードで発生すべき床反力モーメントとが決定される。

この場合、モデル上体水平位置安定化床反力モーメントは、例えば次式により決定される。

モデル上体水平位置安定化床反力モーメント

$$= Mpfdmd + Mltd - Min + h * (Fltd - Fin)$$

……式 e 0 1

また、モデル上体姿勢角安定化床反力モーメントは、例えば次式により決定される。

モデル上体姿勢角安定化床反力モーメント

$$5 \quad = M_{rfdmd} - h * (F_{ltd} - F_{in}) \quad \dots\dots \text{式 } e \ 0 \ 2$$

次いで、上体水平加速度の今回値（時刻  $t$  での値）と上体姿勢角加速度の今回値（時刻  $t$  での値）とが決定される。この場合、上体水平加速度は、例えば、前記式 0 2 の左辺の  $F_x$  を  $F_{ltd}$  に設定した式を  
 10  $d^2X_b/dt^2$  について解くことにより求められる上体質点 2 4 m の水平加速度から決定される。また、上体姿勢角加速度は、例えば、前記の如く求めたモデル上体姿勢角安定化床反力モーメントを前記上体慣性モーメント  $J$  で割ることにより求められる。あるいは、例えば式 0 3 の左辺の  $M_y$  を上記の如く求めたモデル上体水平位置安定化床反力モーメントと  
 15 モデル上体姿勢角安定化床反力モーメントとの和に設定し、且つ、式 0 3 の右辺第 2 項の  $d^2X_b/dt^2$  を上記の如く求めた上体質点 2 4 m の水平加速度（今回値）に設定してなる式を  $d^2\theta_{by}/dt^2$  について解くことにより求められる。なお、この場合、式 0 3 の右辺第 1 項の  $X_b$ （上体質点 2 4 m の水平位置）に対応する上体水平位置の今回値は未だ求められていないが、例えば上体水平位置の前回値（時刻  $t - \Delta t$  の制御周期で求めた値）に対応する  $X_b$  を用いればよい。あるいは、上記の如く求めた上体水平加速度の今回値を用いて上体水平加速度を現在時刻  $t$  まで 2 階積分してなる上体水平位置の今回値に対応する上体質点 2 4 m の水平位置を  $X_b$  として用いてもよい。

25 以上説明した処理により前記復元条件 1～5 を満たすようにモデル上体水平位置安定化床反力モーメントおよびモデル上体姿勢角安定化床反



力モーメントが決定され、さらに上体水平加速度および上体姿勢角加速度が決定される。

上述したようにS 2 2 0 8の処理を実行した後、S 2 2 1 0に進み、前記式d 3 0により、モデル操作床反力モーメントが決定される。すなわち、S 2 2 0 8で求めたモデル上体水平位置安定化床反力モーメントとモデル上体姿勢角安定化床反力モーメントとの和がモデル操作床反力モーメントとして決定される。なお、最終的に決定される修正歩容の運動の今回瞬時値に基づいて目標ZMPまわりの床反力モーメントを直接算出して、これをもってモデル操作床反力モーメントとしても良い。

10 次いで、S 2 2 1 2に進み、前記式d 2 7により、コンプライアンス制御用目標床反力モーメントが決定される。すなわち、補償全床反力モーメント  $M_{dmd}$  とS 2 2 1 0で求めたモデル操作床反力モーメントとの和がコンプライアンス制御用目標床反力モーメントとして決定される。

以上により、図45のS 2 1 1 2の処理が終了し、次に、S 2 1 1 4に進む。このS 2 1 1 4の処理は、前記第1実施形態における図40のS 1 0 1 4と同一であり、上体水平加速度の2階積分により上体水平位置の今回値が決定されると共に、上体姿勢角加速度の2階積分により上体姿勢角の今回値が決定される。

次いで、図44のS 2 0 3 2、S 2 0 3 4に進んで、前記第1実施形態における図12のS 0 3 2、S 0 3 4と同一の処理が実行され、歩容生成処理が繰り返される。

なお、補足すると、本実施形態における動力学モデルによる歩容瞬時値決定においては、動力学モデルの状態量（あるいは前回、前前回の歩容瞬時値）も必要であるので、修正歩容生成用と元歩容生成用との2つの動力学モデルが必要である。

本実施形態においては、上記のごとく、元歩容と修正歩容とが並列的

に生成され、修正歩容は、実ロボット 1 の姿勢安定化のために修正され  
ると共に、コンプライアンス制御により姿勢復元に必要な床反力モーメ  
ントを発生してもまだ余裕がある場合には、この余裕を用いて、可能な  
範囲で元歩容に収束するようにしている。このため、前記第 1 実施形態  
5 の作用効果に加え、当初設定した元歩容に近い、すなわち、当初の要求  
通りの歩容に近い歩容を生成することができる。したがって、あらかじめ  
設定された移動経路がある場合には、移動経路から大きくずれること  
を防止することが可能となる。また、修正歩容の上体姿勢角が元歩容  
(当初決定した歩容)の上体姿勢角に収束することを、修正歩容の上体  
10 水平位置が元歩容(当初決定した歩容)の上体水平位置に収束すること  
よりも優先した(床反力水平成分許容範囲を満たす範囲で可能な限り上  
体並進モードの運動を調整した)ので、上体姿勢角が大きく変動するこ  
とを抑制することができる。

ここで、前述した第 2 実施形態と本発明との対応関係を説明しておく。  
15 第 2 実施形態は、前記第 1 ～ 1 4 発明、第 1 6 ～ 2 3 発明に対応してい  
る。この場合、第 2 実施形態では、ロボット 1 の上体姿勢角がロボットの  
姿勢の状態量に相当し、床反力水平成分が制限対象量に相当し、モデル  
操作床反力モーメントが目標床反力の修正操作量に相当し、補償全床  
反力モーメント  $M_{dmd}$  が第 1 要求操作量に相当し、コンプライアンス  
20 ス制御用床反力モーメントが実床反力操作量に相当し、モデル上体水平  
位置安定化床反力モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  およびモデル上体姿勢角  
安定化床反力モーメント要求値  $M_{rfdmd}$  が第 2 要求操作量に相当する。  
また、動力学モデルとして、図 1 0 のものが用いられ、そのモデルの運  
動は上体並進モードと上体回転モードを含んでいる。また、歩容パラメ  
25 ータは図 4 4 の S 2 0 2 8 の処理で修正歩容の状態量に応じて適宜修正  
される。

次に本発明の第 3 実施形態を図 4 7 ～ 図 5 5 を参照して説明する。なお、本実施形態の説明で、前記第 1 実施形態もしくは第 2 実施形態と同一構成部分もしくは同一機能部分については第 1 実施形態もしくは第 2 実施形態と同一の参照符号を用いて詳細な説明を省略する。

5      本実施形態では、制御ユニット 2 6 の機能的構成は、前記第 2 実施形態のもの、すなわち前記図 4 3 に示したものと同一である。但し、本実施形態では、歩容生成装置 1 0 0 が実行する歩容生成のアルゴリズムは、前記第 2 実施形態のものと相違している。そして、歩容生成装置 1 0 0 以外の各部の処理は、前記第 2 実施形態と同一である。

10      図 4 7 は、本実施形態における歩容生成装置 1 0 0 の処理の概要を示すブロック図である。この図 4 7 を参照して、歩容生成装置 1 0 0 の処理の概要を以下に説明する。なお、図 4 7 を用いて以下に説明する処理の概要は、後述する第 4 ～ 第 6 実施形態についても同様である。

図示の如く、歩容生成装置 1 0 0 は歩容パラメータ決定部 1 0 0 a を  
15      備える。歩容パラメータ決定部 1 0 0 a は、目標歩容のパラメータ（目標歩容を規定するパラメータ）の値あるいは時系列テーブルを決定する。これは、後述の図 4 8 のフローチャートの S 3 0 1 8 から S 3 0 3 0 までの処理に相当する。

詳細は後述するが、歩容パラメータ決定部 1 0 0 a が決定するパラメータには、目標足平位置姿勢軌道、目標腕姿勢軌道、基準上体姿勢軌道、  
20      目標 Z M P 軌道、目標床反力鉛直成分軌道等を規定するパラメータが含まれる他、床反力水平成分許容範囲を規定するパラメータと、Z M P 許容範囲を規定するパラメータとが含まれる。この場合、本実施形態で設定する床反力水平成分許容範囲は、後述の S 3 0 2 6 の処理で設定される単純化モデル歩容用のものと、S 3 0 3 0 で設定される歩容補正用の  
25      ものとの 2 種類がある。一方、Z M P 許容範囲は、S 3 0 3 0 処理で設

定される歩容補正用のものだけである。

ここで、ZMP許容範囲は、本実施形態における床反力モーメント許容範囲に対応するものであり、前記第1実施形態で図39を参照して説明した如く設定される。

- 5 歩容パラメータ決定部100aで決定された歩容パラメータは目標瞬時値発生部100bに入力される。目標瞬時値発生部100bは入力された歩容パラメータに基づき、目標足平位置姿勢、目標ZMP、目標床反力鉛直成分、目標腕姿勢、目標全体重心鉛直位置、目標上体鉛直位置、床反力水平成分許容範囲、ZMP許容範囲および基準上体姿勢角の、  
10 現在時刻tにおける瞬時値を逐次算出（発生）する（図47では一部の目標瞬時値のみを記載している）。この目標瞬時値発生部100bの処理は、後述の図48のフローチャートS3032の処理のなかで実行される図40のS1000～S1010の処理、並びに、図48のS3034、S3036の処理に相当する。なお、本実施形態では、目標瞬時値  
15 発生部100bが算出する目標瞬時値のうち、一部の瞬時値（具体的には目標上体鉛直位置の瞬時値）は仮値であり、後に修正される。また、目標瞬時値発生部100bが算出する床反力水平成分許容範囲の瞬時値は、単純化モデル歩容用の瞬時値と歩容補正用の瞬時値とがある。

- 目標瞬時値発生部100bで算出（発生）された目標瞬時値（一部は  
20 仮瞬時値）は、フルモデル補正部100cに入力される。また、フルモデル補正部100cには、前記姿勢安定化制御演算部112（図43を参照）で求められる補償全床反力モーメント  $M_{dmd}$  も入力される。フルモデル補正部100cは、動力学モデルとして、単純化モデル100c1とフルモデル100c2とを備える。該フルモデル補正部100c  
25 は、単純化モデル100c1に基づいて、入力値から目標上体位置姿勢の仮瞬時値等を決定すると共に、さらに決定された上体位置姿勢の仮瞬

時値等をフルモデル100c2を用いて修正する。

尚、単純化モデル100c1をフルモデル補正部100c2に含ませない構成も可能である。また、フルモデル100c2は、後述するように、逆フルモデル（逆動力学フルモデル）と順フルモデル（順動力学フルモデル）とのいずれかを含む。

フルモデル補正部100cは、基本的には、次のA1～A3の条件を満足するように、Bの処理を実行する。すなわち、フルモデル補正部100cは、

A1) 単に単純化モデルに基づいて生成した歩容（以降、これを単純化モデル歩容と呼ぶ）よりも高い精度で動力学的平衡条件を満足する。

A2) 真のZMP（目標ZMPのまわりにコンプライアンス制御用目標床反力モーメントを発生させることによって修正された本来の定義を満足するZMP）は、ZMP許容範囲（安定余裕が十分維持できる許容範囲）に存在する。

A3) 床反力水平成分は歩容補正用の床反力水平成分許容範囲内になる。という条件を満足するように、

B) 単純化モデルを用いて決定された単純化モデル歩容の上体位置姿勢を補正すると共に、目標ZMPまわりのコンプライアンス制御用目標床反力モーメントを出力する。

なお、上記条件A2は、目標ZMPまわりに発生させる床反力モーメントをZMP許容範囲に対応する床反力モーメント許容範囲内に収めることと同等である。

ここで、上記単純化モデル100c1とフルモデル100c2とについて説明しておく。単純化モデル100c1は、動力学的精度よりも、演算量低減や挙動解析のし易さに重点を置いた動力学モデルであり、動

視したり)、矛盾があるもの(厳密さを欠くもの)でも良い。本実施形態では前記第1実施形態で説明した図10の動力学モデル(前記式01~05で記述される動力学モデル)が単純化モデル100c1として用いられる。

- 5        また、フルモデル100c2は、単純化モデル100c1とは異なるロボット動力学モデルを意味する。これは、単純化モデル100c1よりも近似精度の高いロボット動力学モデルであることが望ましい。図示例で説明すれば、本実施形態では先に述べたように前記図10に示した動力学モデルを単純化モデル100c1として用いるので、それよりも、
- 10        近似精度の高い、例えば図11に示す多質点モデル(ロボット1の各リンクにそれぞれ質点を有するモデル)のようなロボット動力学モデルをフルモデル100c2として用いることが望ましい。この場合、該フルモデル100c2は、質点のまわりに慣性モーメントを設定するものであっても良い。
- 15        しかし、単純化モデル100c1とフルモデル100c2とは、必ずしもモデルの近似精度が異なる必要はない。単純化モデル100c1とフルモデル100c2とは、動力学方程式が同じで、床反力水平成分許容範囲が異なっている、すなわち、単純化モデル歩容用の許容範囲と、歩容補正用の許容範囲とが異なっているだけでも良い。たとえば、単純
- 20        化モデル100c1を用いた歩容を生成する際の床反力水平成分許容範囲を大きくとり(摩擦限界を越えていても良い)、フルモデル100c2を用いて歩容を修正する際の床反力水平成分許容範囲をスリッパしにくいように狭く設定するだけでも良い。

- 尚、この明細書において、目標足平位置姿勢、目標床反力(特に、目
- 25        標ZMPと目標床反力鉛直成分)に基づいて(入力して)上体位置姿勢を算出する(出力させる)のに使用するモデルを「順動力学モデル」と

呼び、目標足平位置姿勢、目標上体姿勢、目標上体位置に基づいて（入力して）床反力（特に、目標ZMPもしくは目標ZMPまわりの床反力モーメントと床反力水平成分）を算出する（出力させる）のに使用するモデルを「逆動力学モデル」と呼ぶ。順動力学モデルの入力には、少なくとも目標床反力が含まれ、逆動力学モデルの入力には、少なくとも目標運動が含まれる。

フルモデル補正部100cが備えるフルモデル100c2は、逆動力学フルモデル（しばしば「逆フルモデル」と略称）または順動力学フルモデル（しばしば「順フルモデル」と略称）を備える。一般的には、逆動力学モデルの演算に比べ、順動力学モデルの演算は、演算量が多くなりがちである。

以上が歩容生成装置100における処理の概要である。

次に、本実施形態における歩容生成装置100の処理を詳説する。本実施形態における歩容生成装置100は、図48のフローチャートに示す処理を実行して、歩容を生成する。

まず、S3010からS3028までにて、前記第1実施形態で説明した図12のS010からS028までの処理と同一の処理が実行される。なお、S3026のサブルーチンである図32のS608で決定する今回歩容の床反力水平成分許容範囲は、前記第1実施形態や第2実施形態の場合よりも厳密に摩擦力限界を考慮せずともよく、摩擦力限界を超えるような範囲に設定してもよい。これは、後述するフルモデル補正によって、床反力水平成分は最終的に歩容補正用の床反力水平成分許容範囲によって制限されることとなるからである。

次いで、S3030に進み、歩容補正用の床反力水平成分許容範囲とZMP許容範囲（床反力中心点許容範囲）とをそれぞれ規定するパラメータを決定する。この場合、歩容補正用の床反力水平成分許容範囲は、

例えば前記単純化モデル歩容用の床反力水平成分許容範囲と同様、X軸方向（前後方向）、Y軸方向（左右方向）のそれぞれについて、床反力鉛直成分軌道と、前記式12とに基づいて、前記図33に示したようなパターンに設定される。そして、例えば、前記式12の  $k_a \cdot \mu$  の値が歩容補正用の床反力水平成分許容範囲を規定するパラメータとして設定される。但し、この床反力水平成分許容範囲は、式12の係数  $k_a$  の値を、単純化モデル歩容用の床反力水平成分許容範囲よりも小さめに設定する等して、確実に摩擦限界内の範囲に設定することが望ましい。

また、ZMP許容範囲は、前記第1実施形態における図12のS029で床反力モーメント許容範囲の設定に関して説明した場合と同様に設定される。なお、ZMP許容範囲に、床反力鉛直成分を乗算することで、ZMP許容範囲をこれと等価な床反力モーメント許容範囲に変換してもよいことはもちろんである。

次いで、S3032に進み今回歩容瞬時値（現在時刻  $t$  の値）が前記単純化モデル（図10の動力学モデル）を用いて決定される。このS3032の処理は、一部の処理を除いて第1実施形態における図12のS030の処理と同一である。さらに詳細には、S3032の処理では、モデル操作床反力モーメントを0として、換言すれば、目標ZMPまわりに発生する床反力モーメントが0になるように今回歩容瞬時値が決定される。すなわち、S3032の処理では、その処理内のサブルーチン処理である図41のS1102、S1122の処理が、モデル操作床反力モーメントを0として実行される。これ以外は、第1実施形態のS030の処理と同一である。

次いでS3034に進んで、スピン力をキャンセルするための腕動作が決定される。この処理は、第1実施形態における図12のS032の処理と同一である。



以上説明したS 3 0 3 4までの処理によって生成された現在時刻  $t$  における歩容の瞬時値を、以降、単純化モデル歩容瞬時値という。本実施形態では、この単純化モデル歩容瞬時値は、単純化モデル（図10の動力学モデル）を用いて、ロボット1にその運動によって発生する慣性力と重力との合力が目標ZMPまわりに発生する床反力モーメントが0になるように（目標ZMPに関する動力学的平衡条件を満たすように）決定される。

この場合、単純化モデル歩容瞬時値のうちの、上体水平位置および上体姿勢角の瞬時値と、上体鉛直位置の瞬時値とは仮瞬時値であり、後述するフルモデル補正によって補正されるものである。また、本実施形態における単純化モデル歩容瞬時値のうち、目標ZMPまわりの目標床反力モーメントの瞬時値は定常的に0であるが、後述するフルモデル補正によって目標ZMPまわりに発生させる床反力モーメントの目標値としてのコンプライアンス制御用目標床反力モーメントが生成される。

次に、S 3 0 3 6に進み、歩容補正用の床反力水平成分許容範囲とZMP許容範囲を規定するパラメータ（S 3 0 3 0で設定したもの）を基に、歩容補正用の床反力水平成分許容範囲と、ZMP許容範囲との瞬時値（現在時刻  $t$  の値）が求められる。

次いで、S 3 0 3 8に進み、フルモデルを用いて補正歩容の発生（歩容の補正）を行い、最終的な目標歩容の瞬時値が決定される。すなわち、前記図47を参照して説明したように、補正目標上体位置姿勢や、目標ZMPまわりの目標床反力モーメントとしてのコンプライアンス制御用目標床反力モーメントの算出（決定）などが実行される。

次いで、S 3 0 4 0に進み、時刻  $t$  を  $\Delta t$  だけ増やし、再びS 3 0 1 4に戻り、S 3 0 1 4からS 3 0 4 0までの処理が繰り返される。

上記S 3 0 3 8の処理は、本実施形態の特徴をなす部分であり、以下

にその処理を詳説する。本実施形態に係る装置の歩容補正手法は、フルモデルフィードフォワード補正型である。また、逆動力学フルモデル（逆フルモデル）を用いる手法で、かつ単純化モデル歩容の入力を補正しない手法であり、かつ摂動モデルを用いる手法である。

- 5 図49は、本実施形態に係る歩容生成装置100の動作、具体的には、図48のフロー・チャートのS3038の歩容の修正手法を説明する機能ブロック図である。ただし、図49の単純化モデル200は、単に動力学モデルだけでなく、前述のS3010からS3034の処理、すなわち単純化モデル歩容瞬時値の算出（決定）処理を表す。したがって、
- 10 図49において、単純化モデル200から先の部分がS3038の処理に相当する。

尚、歩容補正用の床反力水平成分許容範囲とZMP許容範囲の瞬時値を決定処理は、図48のフローチャートの参照符号S3036を用いて示している。

- 15 実際の処理はひとつのコンピュータで実行されるので、ブロック図を離散化した後、ブロック図の上流側から下流側（歩容出力側）に向かって順に実行される。ただし、上流側に戻るフィードバック量は、前回制御周期（現在時刻 $t$ に対して時刻 $t - \Delta t$ ）に算出した値（状態量）を用いることとする。尚、以降、前回制御周期（時刻 $t - \Delta t$ ）に算出した値を前回値と略す。
- 20

S3038の処理が実行される毎に、ブロック図の1制御周期分の演算が実行される。

- S3038では、まず、上記のごとく得られた単純化モデル歩容の目標上体姿勢角（以降、単純化モデル上体姿勢角と呼ぶ）、目標上体水平位置（以降、単純化モデル上体水平位置と呼ぶ）、目標重心位置、目標足平位置姿勢、目標腕姿勢などの運動を表す変数（これを運動変数と呼
- 25

ぶ)の瞬時値と、目標ZMPの瞬時値とが前記逆動力学フルモデル(逆フルモデル)201に入力される。入力された運動変数で表される運動に釣り合う(すなわち運動によってフルモデルが発生する)床反力水平成分と目標ZMPまわりの床反力モーメントが、逆フルモデル201の  
5 演算処理によって算出される。なお、単純化モデル歩容における目標ZMPまわりの床反力モーメントは0であるので、逆フルモデル201によって算出される目標ZMPまわりの床反力モーメントは、単純化モデル歩容の誤差としての意味を持つものである。なお、逆フルモデル201により求められた床反力水平成分と床反力モーメントをそれぞれ「フルモデル床反力水平成分」、「フルモデル床反力モーメント」と呼ぶ。また、以降、しばしば、フルモデル床反力水平成分を  $F_{full}$ 、フルモデル床反力モーメントを  $M_{full}$  と略す。  
10

また、前記逆フルモデル201は、目標重心位置を満足する上体鉛直位置を算出する。さらに、図示は省略しているが、逆フルモデル201  
15 は、重心水平位置も算出する。

補足すると、フルモデルには目標全体重心鉛直位置を入力しており、また目標床反力鉛直成分は目標全体重心鉛直位置の2階微分値から求められるので、フルモデルには、特に目標床反力鉛直成分を入力する必要はない。冗長であっても演算を減らすためなどの理由で、フルモデルに  
20 目標床反力鉛直成分を入力しても良い。

ここで、歩容補正に用いられる摂動モデルについて説明する。

摂動モデルは、上体水平位置補正用摂動モデル202および上体姿勢角補正用摂動モデル203から成る。尚、摂動モデルは、このようにふたつのモデルに分離しないで、図10のようなひとつのモデルにしても  
25 良い。

上体水平位置補正用摂動モデル202は、前記上体並進モードにおけ

る床反力の摂動と上体水平位置の摂動との関係を表す。

上体水平位置補正用摂動モデル 202 は、目標床反力モーメントの補正量を入力し、これに動学的に釣り合う目標上体水平位置の補正量を算出する。この入力（目標床反力モーメントの補正量）を、上体水平位置補正用摂動モデルモーメント  $M_p$  と呼ぶ。また、上体水平位置補正用摂動モデル 202 の出力（目標上体水平位置の補正量）を、補正用摂動モデル上体水平位置  $X_c$  と呼ぶ。また、上体水平位置補正用摂動モデル 202 が発生する床反力水平成分を上体水平位置補正用摂動モデル床反力水平成分  $F_p$  と呼ぶ。

10 上体水平位置補正用摂動モデル 202 は、図 50 のように、支点と倒立振子質点（上体質点）とこれらを結合する伸縮自在な支持棒から成る倒立振子で表される。支点の水平位置は前記した今回歩容の支持脚座標系の原点の水平位置に一致し、支点の鉛直位置は目標 ZMP の鉛直位置に一致するように支点の位置が設定されている。倒立振子質点の質量  
15  $m_b$  は、図 10 に示す前記単純化モデル（3 質点＋フライホイールのモデル）の上体質点質量と同じである。倒立振子質点の鉛直位置  $Z_c$  は、単純化歩容に対応する図 10 に示す単純化モデルの上体質点位置の鉛直位置  $Z_b$  と同一とする。

この上体水平位置補正用摂動モデル 202 は、前記単純化モデル（3  
20 質点モデル）の動力学方程式の式 01、式 02、式 03 において、床反力モーメントの摂動  $\Delta M_y$  と上体質点水平位置の摂動  $\Delta X_b$  の関係を表す。

そこで、 $M_y$ 、 $X_b$ 、 $Z_b$  以外は定数とみなして、床反力モーメントの摂動  $\Delta M_y$  と上体質点水平位置の摂動  $\Delta X_b$  の関係を式 03 から求め  
25 と、次式が得られる。

$$\Delta M_y = -m_b \cdot \Delta X_b \cdot (g + d^2 Z_b / dt^2) + m_b \cdot (Z_b - Z_{zmp}) \cdot d^2 \Delta X_b / dt^2$$

…式 a 1 2

同様に、 $F_x$ 、 $X_b$  以外は定数とみなして、床反力水平成分の摂動  $\Delta F_x$  と上体質点水平位置の摂動  $\Delta X_b$  の関係を式 a 9 から求めると、次式が得られる。

$$\Delta F_x = m_b \cdot d^2 \Delta X_b / dt^2 \quad \dots \text{式 a 1 3}$$

10 上体水平加速度によって発生する  $\Delta M_p$  と  $\Delta F_p$  の比である前記上体並進モード床反力比率  $h$  は、式 a 1 2 右辺のうちの上体水平加速によって発生する項（すなわち第 2 項）と式 a 1 3 との比であるから、次式が得られる。

$$15 \quad h = (Z_b - Z_{zmp}) \quad \dots \text{式 a 1 4}$$

すなわち、上体並進モード床反力比率  $h$  は、単純化モデルの上体質点（倒立振子質点）の支点からの高さに相当する。

よって、式 a 1 2 と式 a 1 4 より次式が得られる。

20

$$\Delta M_y = -m_b \cdot \Delta X_b \cdot (g + d^2 Z_b / dt^2) + m_b \cdot h \cdot d^2 \Delta X_b / dt^2 \quad \dots \text{式 a 1 5}$$

一方、上体質点（倒立振子質点）に作用する重力と慣性力との合力の並進力鉛直成分に釣り合う床反力鉛直成分を上体床反力鉛直成分  $F_{bz}$  と呼ぶ。すなわち、上体床反力鉛直成分  $F_{bz}$  は、次式で定義される。

25

1 4 4

$$F_{bz} = m_b \cdot (g + d^2 Z_b / dt^2) \quad \dots \text{式 a 1 6}$$

式 a 8 より、上体床反力鉛直成分  $F_{bz}$  は次式となる。

$$F_{bz} = F_z - m_{sup} \cdot (g + d^2 Z_{sup} / dt^2) - m_{swg} \cdot (g + d^2 Z_{swg} / dt^2)$$

5

…式 a 1 7

言い換えると、上体床反力鉛直成分は、床反力鉛直成分  $F_z$  と図 1 0 に示す前記単純化モデル（3 質点＋フライホイールのモデル）の両脚質点に作用する重力と慣性力との合力の並進力鉛直成分との和に等しい。

10 式 a 1 6 を式 a 1 5 に代入することにより、次式が得られる。

$$\Delta M_y = -F_{bz} \cdot \Delta X_b + m_b \cdot h \cdot d^2 \Delta X_b / dt^2 \quad \dots \text{式 a 1 8}$$

式 a 1 8 の  $\Delta M_y$  を上体水平位置補正用摂動モデルモーメント  $M_p$ 、  
15  $\Delta X_b$  を補正用摂動モデル上体水平位置  $X_c$  に対応させることにより  
（式 a 1 8 の  $\Delta M_y$  に上体水平位置補正用摂動モデルモーメント  $M_p$ 、  
 $\Delta X_b$  に補正用摂動モデル上体水平位置  $X_c$  を代入することにより）、次  
式が得られる。

$$20 \quad M_p = -F_{bz} \cdot X_c + m_b \cdot h \cdot d^2 X_c / dt^2 \quad \dots \text{式 a 1 9}$$

すなわち、上体水平位置補正用摂動モデル 2 0 2 は、式 a 1 4 によって求められる上体並進モード床反力比率  $h$  と式 a 1 7 によって求められる上体床反力鉛直成分  $F_{bz}$  を用いて、式 a 1 9 で表される。

25 また、式 a 1 3 の  $\Delta F_x$  を上体水平位置補正用摂動モデル床反力水平成分  $F_p$  に対応させることにより、次式が得られる。

145

$$F_p = m_b \cdot d^2 X_c / dt^2 \quad \dots \text{式 a20}$$

すなわち、式 a14、式 a17、式 a19、式 a20によって上体水平位置補正用振動モデル202が記述される。

- 5 補足すると、ここでは、上体質点位置の振動と上体位置（上体代表点位置）の振動は一致するものとみなしているが、厳密には、一致するとは限らない。従って、 $M_p$ 、 $F_p$  と  $X_c$  の関係を求めるためには、さらに上体質点水平位置と上体位置の幾何学的関係を表すモデルが必要である。

- 10 一方、上体姿勢角補正用振動モデル203は、前記上体回転モードにおける床反力の振動と上体姿勢角の振動の関係を表す。

- 上体姿勢角補正用振動モデル203は、床反力モーメントの補正量が入力され、これに動学的に釣り合う目標上体姿勢角の補正量を算出する。この入力（床反力モーメントの補正量）を、上体姿勢角補正用振動モデルモーメント  $M_r$  と呼ぶ。また、上体姿勢角補正量振動モデル203の出力（目標上体姿勢角の補正量）を補正用振動モデル上体姿勢角  $\theta_c$  と呼ぶ。また、上体姿勢角補正用振動モデルが発生する床反力水平成分を上体水平位置補正用振動モデル床反力水平成分  $F_r$  と呼ぶ。 $F_r$  は前述したごとく0である。すなわち、次式が常に成立する。
- 15

$$20 \quad F_r = 0 \quad \dots \text{式 a21}$$

- 上体姿勢角補正用振動モデル203は、図51のように、フライホイール FH で表される。フライホイールのイナーシャは、図10に示した前記単純化モデル（3質点モデル+フライホイール）のフライホイール FH と同じである。この上体姿勢角補正用振動モデル203のフライホイールの回転角度が補正用振動モデル上体姿勢角  $\theta_c$ 、そのフライホイ
- 25

ールによって発生する床反力モーメントが上体姿勢角補正用摂動モデルモーメント  $M_r$  に相当する。

この上体姿勢角補正用摂動モデル 203 は、前記単純化モデル（3 質点 + フライホイールのモデル）の動力学方程式の前記式 03 において、

5 床反力モーメントの摂動  $\Delta M_y$  と上体姿勢角の摂動  $\Delta \theta_{by}$  の関係を表している。

そこで、 $M_y$ 、 $\theta_{by}$  以外は定数とみなして、床反力モーメントの摂動  $\Delta M_y$  と上体姿勢角の摂動  $\Delta \theta_{by}$  の関係を式 03 から求めると、次式が得られる。

10

$$\Delta M_y = J \cdot d^2 \Delta \theta_{by} / dt^2 \quad \dots \text{式 a22}$$

式 a22 の  $\Delta M_y$  を上体姿勢角補正用摂動モデルモーメント  $M_r$ 、 $\Delta \theta_{by}$  を補正用摂動モデル上体姿勢角  $\theta_c$  に対応させることにより、次

15 式が得られる。

$$M_r = J \cdot d^2 \Delta \theta_c / dt^2 \quad \dots \text{式 a23}$$

すなわち、上体姿勢角補正用摂動モデル 203 は、式 a23 で表される。また、上体水平位置補正用摂動モデル床反力水平成分  $F_r$  は上記したごとく式 a21 のようになる（ $F_r = 0$ ）。

後述するように、S3038 では、最終的に、補正歩容（より詳しくは、単純化モデル歩容の一部の瞬時値を補正した目標瞬時値）が生成（出力）される。補正歩容の目標上体姿勢角（これを以降、補正目標上  
25 体姿勢角と呼ぶ）は、前記求めた単純化モデル上体姿勢角の瞬時値（S3032 で求めた今回歩容の現在時刻  $t$  での目標上体姿勢角の瞬時値）



に前記補正用摂動モデル上体姿勢角  $\theta_c$  (現在時刻  $t$  の制御周期で求められる値) を演算部 204 で加えることにより得られる。補正歩容の目標上体水平位置 (これを以降、補正目標上体水平位置と呼ぶ) は、前記求めた単純化モデル上体水平位置の瞬時値 (S032 で求めた今回歩容  
5 の現在時刻  $t$  での目標上体水平位置の瞬時値) に補正用摂動モデル上体水平位置  $X_c$  (現在時刻  $t$  の制御周期で求められる値) を演算部 205 で加えることにより得られる。

補正歩容の目標床反力も修正される。具体的には、目標 ZMP まわりの床反力モーメント水平成分が 0 でなくなり、コンプライアンス制御用  
10 目標床反力モーメントが目標値として出力される。また、目標床反力水平成分も、補正目標床反力水平成分に修正され、出力される。

上記のごとく、補正歩容の運動は、単純化モデル歩容の運動に摂動モデルの運動 (詳しくは上体位置姿勢補正用摂動モデルと上体姿勢角補正用摂動モデルの運動) を加えた (合成した) 運動である。

15 一般に、ある基準運動に、ある摂動運動を加えた運動が発生する床反力は、基準運動が発生する床反力 (運動によって発生する重力と慣性力に釣り合う床反力) と摂動運動によって発生する床反力の摂動分の和で近似される。

したがって、補正歩容の運動によって発生する床反力 (厳密には、補  
20 正歩容の運動によって発生する床反力を、逆フルモデル 201 を用いて算出した値) は、逆フルモデル 201 の床反力 (単純化モデル歩容の運動によって発生する床反力を、逆フルモデル 201 を用いて算出した値) に上体位置姿勢補正用摂動モデル 202 の入力モーメント (前記上体水平位置補正用摂動モデルモーメント  $M_p$ ) と上体姿勢角補正用摂動  
25 モデル 203 の入力モーメント (前記上体姿勢角補正用摂動モデルモーメント  $M_r$ ) とを加えたものとなる。

補正歩容が、動力学的平衡条件を精度良く満足するということは、補正歩容の運動によって発生する床反力（詳しくは補正歩容の運動によって逆フルモデル 2 0 1 上で発生する床反力）が、補正目標床反力とほぼ一致することであるから、この条件を満足するためには、以下のふたつの式を満足しなければならない。

$$\begin{aligned} & \text{フルモデル床反力モーメント } M_{\text{full}} \\ & + \text{上体水平位置補正用摂動モデルモーメント } M_p \\ & + \text{上体姿勢角補正用摂動モデルモーメント } M_r \\ 10 \quad & = \text{補正目標床反力モーメント} \end{aligned}$$

…式 a 5

$$\begin{aligned} & \text{フルモデル床反力水平成分 } F_{\text{full}} \\ & + \text{上体水平位置補正用摂動モデル床反力水平成分 } F_p \\ & + \text{上体姿勢角補正用摂動モデル床反力水平成分 } F_r \\ 15 \quad & = \text{補正目標床反力水平成分} \end{aligned}$$

…式 a 6

また、補正歩容の真の Z M P は、補正目標床反力モーメントを目標床反力鉛直成分で割った値だけ、単純化モデル歩容の目標 Z M P（理想目標 Z M P）からずれた点に変更される。

20

$$\begin{aligned} \text{補正歩容の真の Z M P} &= \text{目標 Z M P} \\ &+ \text{補正目標床反力モーメント / 目標床反力鉛直成分} \end{aligned}$$

…式 a 7

25

尚、補正歩容の真の Z M P の X 方向（前後方向）成分を算出する場合には、補正目標床反力モーメントの Y 軸（左右方向軸）まわり成分

を用いる。また、補正歩容の真のZMPのY方向成分を算出する場合には、補正目標床反力モーメントのX軸（前後軸）まわり成分を用いる。ただし、補正歩容の真のZMPのY方向成分を算出する場合には、式a7の右辺の「+」は「-」にしなければならない。

- 5 式a7から求められる補正歩容の真のZMPは、ZMP許容範囲内になければならない。これをZMP制約条件と呼ぶ。

また、補正目標床反力水平成分は、歩容補正用の床反力水平成分許容範囲内になければならない。これを床反力水平成分制約条件と呼ぶ。

- 10 以上のように、補正歩容は、式a5、式a6、ZMP制約条件（式a7から得られる補正歩容の真のZMPの存在範囲条件）および床反力水平成分制約条件を満足しなければならない。

しかし、単に、これらの式や条件を満足するだけでは、前記補正用摂動モデル上体位置と前記補正用摂動モデル上体姿勢角が発散してしまう。

- 15 そこで、前記上体水平位置補正用摂動モデル202と前記上体姿勢角補正用摂動モデル203の状態量（より具体的には、補正用摂動モデル上体水平位置速度、補正用摂動モデル上体姿勢角・角速度など）を基に、これらの状態量がある所定の状態に収束する（安定する）ように、補正用摂動モデル202、203の安定化制御を行う。

- 20 まず、上体水平位置補正用摂動モデル202の安定化制御について詳細を説明する。

- 25 先に本出願人が提案した特願2001-133621号では、倒立振り子型の摂動モデルを用い、補正歩容の瞬間姿勢を基にフルモデルを用いて計算される重心水平位置  $XG_f$  を、単純化モデル歩容の瞬間姿勢を基に単純化モデルを用いて計算される重心水平位置  $XG_s$  に収束させる制御則を持ち、その制御則で決定されたフィードバック量（フィードバック操作量）を上体水平位置補正用摂動モデルに付加的に入力していた。

具体的には、式 a 8 で与えられる目標整定位置に収束するように式 a 9 の制御則が与えられていた。ただし、 $m_{total}$  は前記ロボット総重量、 $m_b$  は前記上体質点質量（倒立振子質量）であり、 $X_{Gf}$  は、単純化モデル歩容の瞬間姿勢を基にフルモデルを用いて計算される重心水平位置、  
5 すなわち、前記逆フルモデルが算出する重心水平位置である。また、 $K_p$ 、 $K_v$  はフィードバック制御のゲインである。

$$\text{目標整定位置} = -m_{total}/m_b \cdot (X_{Gf} - X_{Gs}) \quad \dots \text{式 a 8}$$

10 上体水平位置補正用摂動モデル制御用フィードバック量の ZMP 換算値  
=  $K_p \cdot (\text{補正用摂動モデル上体水平位置} - \text{目標整定位置})$   
+  $K_v \cdot \text{補正用摂動モデル上体水平速度}$   
+  $\text{補正用摂動モデル上体水平位置}$

…式 a 9

15

尚、補足すると、実際にコンピュータ上で計算を実行する時には、上記右辺の変数の値には、前回値が用いられる。以降の制御則でも同様である。

本出願人が今回提案するフルモデル補正手法に用いられる上体水平位置補正用摂動モデルは、非線形性は強いものの、前述のごとく、倒立振子型のモデルであるという点では、先に本願出願人が提案した特願 2 0 0 1 - 1 3 3 6 2 1 号に用いられる上体水平位置補正用摂動モデルと類似している。

そこで、今回提案するフルモデル補正手法でも、目標整定位置は同様に決定し、目標整定位置に収束させるための制御則だけを変更することとする。

25

上体水平位置補正用摂動モデル 2 0 2 を目標整定位置に収束（安定）させるための制御則を上体水平位置補正用摂動モデル制御則 2 0 6 と呼び、この制御則が決定するフィードバック量（操作量）を上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  と呼ぶ。ここで

5 「要求値」を付けたのは、後述するように、真の Z M P が前記 Z M P 許容範囲内に存在し、かつ、床反力水平成分が床反力水平成分許容範囲内になるように、上記制御則で決定された値に制限が加えられて修正されるからである。制限が加えられて修正されたモーメントを、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  と呼ぶ。

10 上体水平位置補正用摂動モデル制御則 2 0 6 には、式 a 9 の代わりに、次式を用いれば良い。

上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{pfdmd}$

=  $K_{pp} * (\text{補正用摂動モデル上体水平位置 } X_c - \text{目標整定位置})$

15 +  $K_{pv} * \text{補正用摂動モデル上体水平速度 } dX_c/dt$

− 補正用摂動モデル上体水平位置  $X_c * \text{上体床反力鉛直成分 } F_{bz}$

…式 a 1 0

ただし、 $K_{pp}$ 、 $K_{pv}$  はフィードバック制御のゲインである。

20 上体水平位置補正用摂動モデル 2 0 2 の説明で述べたごとく、上体質点（倒立振り子質点）には鉛直方向に上体床反力鉛直成分  $F_{bz}$  が作用している。このため、上体質点には、上体質点位置が原点（支点位置）からずれていくと、ますますずれようとするモーメントが作用する。式 a 1 0 の右辺第 3 項は、それを打ち消すためのモーメントである。

25 上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  の X 軸（前後方向軸）まわり成分を求める場合には、補正用摂動モデル上

体水平位置速度および目標整定位置は Y 軸方向（左右方向）成分を用いる。

上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  の Y 軸（左右方向軸）まわり成分を求める場合には、補正用摂動モデル上  
5 体水平位置速度および目標整定位置は X 軸方向（前後方向）成分を用い、右辺第 3 項の「-」を「+」に代える。

尚、目標整定位置は、0（倒立振子支点の水平位置）にしても良い。  
また、上体水平位置補正用摂動モデル制御則 2 0 6 は、先に本出願人が提案した特願 2 0 0 1 - 1 3 3 6 2 1 号に述べたような各種方法のいず  
10 れかにしても良い。また、それら以外でも、少なくとも上体水平位置補正用摂動モデル 2 0 2 の状態量のいずれか（より具体的には補正用摂動モデル上体水平位置速度など）を基に、この状態量がある所定の状態に収束する（安定する）ように、上体水平位置補正用摂動モデルの安定化制御則 2 0 6 を決定すれば良い。

15 次に、上体姿勢角補正用摂動モデル 2 0 3 の安定化制御について詳細を説明する。

目標瞬時値発生部 1 0 0 b が出力する基準上体姿勢角（図 4 0 の S 1 0 0 4 で求められたもの）あるいは単純化モデルによる目標上体姿勢角（図 4 0 の S 1 0 1 4 で求められたもの）に、補正目標上体姿勢角、す  
20 なわち、単純化モデルによる目標上体姿勢角に補正用摂動モデル上体姿勢角を加えたものが整定あるいは追従するように、上体姿勢角補正用摂動モデル 2 0 3 の状態に応じて、P I 制御などのフィードバック制御則によってフィードバック量（操作量）を決定し、これを上体姿勢角補正用摂動モデル 2 0 3 に付加的に入力する。

25 この制御則を上体姿勢角補正用摂動モデル制御則 2 0 7 と呼び、このフィードバック量（操作量）を上体姿勢角補正用摂動モデル安定化モー

メント要求値  $Mrfdmd$  と呼ぶ。ここで「要求値」を付けたのは、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $Mpfdmd$  と同様の理由からである。制限が加えられて修正されたモーメントを、上体姿勢角補正用摂動モデル安定化モーメント  $Mrf$  と呼ぶ。

- 5 上体姿勢角補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $Mrfdmd$  を決定する上体姿勢角補正用摂動モデル制御則 207 は、具体的には、次式のようにすれば良い。

上体姿勢角補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $Mrfdmd$

10  $= K_{rp} * (\text{補正用摂動モデル上体姿勢角 } \theta_c$

— (基準上体姿勢角—単純化モデルによる目標上体姿勢角))

+  $K_{rv} * \text{補正用摂動モデル上体姿勢角速度 } d\theta_c/dt$

…式 a 1 1

ただし、 $K_{rp}$ 、 $K_{rv}$  はフィードバック制御のゲインである。

15

なお、式 a 1 1 において、(基準上体姿勢角—単純化モデルによる目標上体姿勢角) の代わりに 0 としてもよい。

- 再び、図 49 の機能ブロック図を用いて S 3038 の処理を説明すると、上記のごとく、前記上体水平位置補正用摂動モデル制御則 206 (式 a 1 0) によって上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $Mpfdmd$  が求められる。また、前記上体姿勢角補正用摂動モデル制御則 207 (式 a 1 1) によって上体姿勢角補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $Mrfdmd$  が求められる。
- 20

- 次いで、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $Mpf$  が 0 であつたと仮定した場合の上体位置補正用摂動モデルの床反力推定 (算出) 値  $F0$  が  $F0$  演算部 208 により求められる。後述するように、上
- 25

体水平位置補正用摂動モデル 2 0 2 には、フルモデル床反力モーメント  $M_{full}$  に、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  を加えられたものが入力される。したがって、 $F_0$  は、上体水平位置補正用摂動モデル 2 0 2 にフルモデル床反力モーメント  $M_{full}$  の符号を反転させたものだけが入力された場合に上体水平位置補正用摂動モデル 2 0 2 が発生する床反力である。

具体的には、次式によって  $F_0$  が求められる。

$$F_0 = m_b \cdot d^2 X_c / dt^2 - 1/h \cdot M_{pf} \quad \dots \text{式 a 1 2}$$

10

右辺第 1 項は、前回（時刻  $t - \Delta t$ ）の上体水平位置補正用摂動モデル 2 0 2 の床反力水平成分を表す。

右辺第 2 項は、前回の上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  によって、上体水平位置補正用摂動モデル 2 0 2 に直接的に発生した（すなわち直達項の）床反力水平成分を表す。

すなわち、上体水平位置補正用摂動モデル 2 0 2 の前回の上体質点水平加速度に上体質点の質量  $m_b$  を乗じた値から、前回の上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  を上体並進モード床反力比率  $h$  で割った値を減じることによって、 $M_{pf}$  が 0 であったと仮定した場合の上体位置補正用摂動モデルの床反力  $F_0$  の推定値が求められる。

次に、前記制約（床反力水平成分正条件および ZMP 制約条件）を無視して、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  を上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  に一致させ、かつ、上体姿勢角補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{rf}$  を、上体姿勢角補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{rfdmd}$  に一致させると共に、目標 ZMP まわりの目標床反力モーメントとしてのコンプ

25



ライアンス制御用目標床反力モーメントを補償全床反力モーメント Mdmd と Mpf と Mrf との総和に一致させたと仮定した場合に、目標 ZMP まわりに発生する床反力モーメント Min が Min 演算部 209 により求められる。この床反力モーメントを無制限時補正目標床反力モーメント Min と呼ぶ。無制限時補正目標床反力モーメント Min は、次式によって求められる。

$$\text{Min} = \text{Mpfdmd} + \text{Mrfdmd} + \text{Mdmd} \quad \dots \text{式 a 1 3}$$

すなわち、無制限時補正目標床反力モーメント Min は、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値 Mpfdmd と上体姿勢角補正用摂動モデル安定化モーメント要求値 Mrfdmd と補償全床反力モーメント Mdmd とを加算することにより得られる。

次いで、前記制約（床反力水平成分制約条件および ZMP 制約条件）を無視して、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント Mpf を上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値 Mpfdmd に一致させ、かつ、上体姿勢角補正用摂動モデル安定化モーメント Mrf を、上体姿勢角補正用摂動モデル安定化モーメント要求値 Mrfdmd に一致させると共に、コンプライアンス制御用目標床反力モーメントを補償全床反力モーメント Mdmd と Mpf と Mrf との総和に一致させたと仮定した場合に、発生する床反力水平成分 Fin が Fin 演算部 210 により求められる。この床反力水平成分を無制限時補正目標床反力水平成分 Fin と呼ぶ。

補正目標床反力水平成分は、前記式 a 6 によって得られるが、前述のごとく、上体姿勢角補正用摂動モデル 203 の挙動によって上体姿勢角補正用摂動モデル 203 には床反力水平成分は発生しない、すなわち

Fr は 0 である。したがって、無制限時補正目標床反力水平成分  $F_{in}$  は、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  が 0 であったと仮定した場合の補正目標床反力水平成分に、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  を 0 から上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  に変更したことによって増加する床反力水平成分を加えたものになる。

ところで、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  を 0 から上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  に変更したことによって増加する床反力水平成分は、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  を上体並進モード床反力比率  $h$  で割った値になる。

したがって、無制限時補正目標床反力水平成分  $F_{in}$  は、式 a 15 に示すように、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  を上体並進モード床反力比率  $h$  で割った値に、前記求めたフルモデル床反力水平成分  $F_{full}$  を加算し、さらに、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  が 0 であったと仮定した場合の上体位置補正用摂動モデルの床反力の算出値  $F_0$  を加算することによって得られる。

$$F_{in} = 1/h * M_{pfdmd} + F_{full} + F_0 \quad \dots \text{式 a 15}$$

次いで、後に詳説する制限手段（制限処理部）211によって、無制限時補正目標床反力モーメント  $M_{in}$  と無制限時補正目標床反力水平成分  $F_{in}$  とから、これらに制限を加えた値である（目標 ZMP まわりの）制限補正目標床反力モーメント  $M_{ltd}$  と制限補正目標床反力水平成分  $F_{ltd}$  が決定される。本実施形態では、コンプライアンス制御用目標

床反力モーメントは、制限補正目標床反力モーメント  $M_{ltd}$  に一致し、補正歩容の床反力水平成分は制限補正目標床反力水平成分  $F_{ltd}$  に一致する。

制限補正目標床反力モーメント  $M_{ltd}$  と制限補正目標床反力水平成分  $F_{ltd}$  とは、補正歩容（コンプライアンス制御用目標床反力モーメントを含む）の真の Z M P が前記 Z M P 許容範囲内に存在し、かつ、補正歩容の床反力水平成分が床反力水平成分許容範囲内になるように決定される。すなわち、 $M_{ltd}$  および  $F_{ltd}$  は Z M P 制約条件および床反力水平成分制約条件を満足するように決定される。

また、上記制約条件下で、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_p$  は、可能な限り、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  に一致または近い値になるように決定される。同様に、上体姿勢角補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_r$  は、可能な限り上体姿勢角補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{rfdmd}$  に一致または近い値になるように決定される。これにより、前記補正用摂動モデル上体位置  $X_c$  と前記補正用摂動モデル上体姿勢角  $\theta_c$  とを安定化し、発散することを防止する。

次いで、以下の式により、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{pf}$ 、および上体姿勢角補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{rf}$  がそれぞれ  $M_{pf}$  演算部 2 1 2、 $M_{rf}$  演算部 2 1 3 により求められる。

$$M_{pf} = (F_{ltd} - F_{full} - F_0) \cdot h \quad \cdots \text{式 a 2 0}$$

$$M_{rf} = M_{ltd} - M_{pf} - M_{dmd} \quad \cdots \text{式 a 2 1}$$

すなわち、 $M_{pf}$  演算部 2 1 2 では、制限補正目標床反力水平成分

Fltd から、フルモデル床反力水平成分 Ffull を減じ、Mp が 0 であったと仮定した場合の上体位置補正用摂動モデル 202 の床反力の算出値 F0 を減じた値に、上体並進モード床反力比率 h を乗じることにより、前記上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント Mpf が得られる。

- 5 また、Mrf 演算部 213 では、目標 ZMP まわりの制限補正目標床反力モーメント Mltd から前記上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント Mpf と補償全床反力モーメント Mdmd とを減じることにより、上体姿勢角補正用摂動モデル安定化モーメント Mrf が得られる。

- 10 次いで、以下の式により、上体水平位置補正用摂動モデル床反力モーメント Mp、および上体姿勢角補正用摂動モデル床反力モーメント Mr が求められる。

$$M_p = M_{pf} - M_{full} \quad \dots \text{式 a 2 2}$$

$$M_r = M_{rf} \quad \dots \text{式 a 2 3}$$

15

- すなわち、Mp 演算部 214 にて、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント Mpf からフルモデル床反力モーメント Mfull を減じることにより、上体水平位置補正用摂動モデル床反力モーメント Mp が得られる。また、上体姿勢角補正用摂動モデル床反力モーメント Mr は、  
20 上体姿勢角補正用摂動モデル安定化モーメント Mrf と同一の値とされる。

次いで、上体水平位置補正用摂動モデル床反力モーメント Mp が上体位置補正用摂動モデル 202 に入力され、その入力された床反力モーメントに釣り合う補正用摂動モデル上体位置 Xc が算出される。

- 25 また、上体姿勢角補正用摂動モデル床反力モーメント Mr が上体姿勢角補正用摂動モデル 203 に入力され、その入力された床反力モーメント

トに釣り合う補正用摂動モデル上体姿勢角  $\theta_c$  が算出される。

次いで、演算部 205, 204 にて、それぞれ次式 a 24、式 a 25 に従って、補正目標上体水平位置と補正目標上体姿勢角とが決定され、これらがそれぞれ上体水平位置姿勢の最終的な目標瞬時値として出力される。

補正目標上体水平位置

$$= \text{単純化モデル上体水平位置} + \text{補正用摂動モデル上体位置 } X_c \quad \dots \text{式 a 24}$$

補正目標上体姿勢角

$$= \text{単純化モデル上体姿勢角} + \text{補正用摂動モデル上体姿勢角 } \theta_c \quad \dots \text{式 a 25}$$

すなわち、単純化モデル上体水平位置に補正用摂動モデル上体位置  $X_c$  を加えることにより補正目標上体水平位置が得られ、これが最終的な目標上体水平位置として出力される。また、単純化モデル上体姿勢角に補正用摂動モデル上体姿勢角  $\theta_c$  を加えることにより補正目標上体姿勢角が得られ、これが最終的な目標上体姿勢角として出力される。

また、目標 ZMP まわりのコンプライアンス制御用目標床反力モーメントとして制限補正目標床反力モーメント  $M_{ltd}$  が出力されると共に、補正目標床反力水平成分として制限補正目標床反力水平成分  $F_{ltd}$  が出力される。

すなわち、次式 a 26、式 a 27 に従って、補正目標床反力水平成分と目標 ZMP まわりの補正目標床反力モーメントとがそれぞれ、床反力水平成分および床反力モーメント（目標 ZMP まわりのモーメント）の

最終的な目標瞬時値として決定され、これらが出力される。

コンプライアンス制御用目標床反力モーメント

= 制限補正目標床反力モーメント  $M_{ltd}$

5

…式 a 2 6

補正目標床反力水平成分

= 制限補正目標床反力水平成分  $F_{ltd}$

…式 a 2 7

10

以上のごとく、S 3 0 3 8 の歩容補正が行われる。

尚、補足すると、本実施形態は、フィードフォワード型の補正であり、また、摂動動力学モデルは厳密モデルではない。このため、上記のごとく式 a 5 および式 a 6 を満足するように歩容を補正しても、厳密には、  
15 動力学平衡条件を満足するのではなく、近似的に動力学平衡条件を満足する。

また、本実施形態では、例えば1歩の歩容の終端（今回歩容終端）において、上体水平位置補正用摂動モデル 2 0 2 の上体運動と上体姿勢角補正用摂動モデル 2 0 3 との状態量、例えば上体水平位置補正用摂動モデル 2 0 2 の上体質点（倒立振子質点）の水平位置や、上体姿勢角補正用摂動モデル 2 0 3 のフライホールの回転角は、単純化モデル 2 0 0 の状態量として追加される。つまり、今回歩容終端における単純化モデル 2 0 0 の状態量が、上体水平位置補正用摂動モデル 2 0 2 の上体運動と上体姿勢角補正用摂動モデル 2 0 3 との状態量を加えたものに修正され  
20  
25 る。さらに、各摂動モデル 2 0 2, 2 0 3 の状態量は初期化される（例えば上体水平位置補正用摂動モデル 2 0 2 の上体質点（倒立振子質点）

の水平位置や、上体姿勢角補正用摂動モデル 203 のフライホールの回転角が 0 にリセットされる)。そして、上記の如く修正した単純化モデル 200 の状態量を次回歩容の初期値として、次回歩容の生成が行なわれると共に、各摂動モデル 202, 203 による補正用摂動モデル上体

5 水平位置  $X_c$  及び補正用摂動モデル上体姿勢角  $\theta_c$  の算出が行なわれる。これにより各摂動モデル 202, 203 の挙動の安定性をより一層高めることができる。なお、上記のような単純化モデル 200 の状態量の修正は、歩容の生成途中で適宜行なってもよい。また、上記のような単純化モデル 200 の状態量の修正は、後述する第 4、第 5 実施形態において

10 ても同様に行なわれる。

次に、前述の制限手段の詳細、すなわち制限処理部 211 の処理の詳細を説明する。

制限手段（制限処理部 211）では、前述した機能を持たせるために、以下の処理が行われる。

15 まず、目標瞬時値発生部 100b が決定した ZMP 許容範囲の瞬時値、すなわち前記図 48 の S3036 で決定された ZMP 許容範囲の瞬時値が、目標 ZMP まわりの床反力モーメント許容範囲の瞬時値に変換される。

具体的には、次式の関係を用いて床反力モーメント許容範囲が求めら

20 れる。

床反力モーメント許容範囲

$$= (ZMP \text{ 許容範囲} - \text{目標 ZMP}) * \text{床反力鉛直成分ベクトル}$$

…式 a32

15

ただし、式 a32 においては、変数はすべてベクトルである。床反力鉛

直成分ベクトルは、鉛直成分以外の成分を0にした並進床反力ベクトルである。また、「\*」は外積を意味する。

ZMP制約条件と床反力水平成分制約条件とを考慮せず、動力学的平衡条件（特に、重力と慣性力の合力が目標ZMPまわりに作用するモーメントの水平成分が0であること）だけを満足する歩容の運動は、サジタルプレーン上での運動と、ラテラルプレーン上での運動とに分離して、それぞれを動力学的平衡条件を満足するように生成してから合成しても、動力学的平衡条件を近似的に満足することが知られている。また、以上のごとくZMP許容範囲と歩容補正用の床反力水平成分許容範囲とを設定することにより、ZMP制約条件および床反力水平成分制約条件も、サジタルプレーン上での制約条件とラテラルプレーン上での制約条件とに分離できる。したがって、ZMP制約条件、床反力水平成分制約条件および動力学的平衡条件のすべてを考慮した歩容の運動も、サジタルプレーン上での運動と、ラテラルプレーン上での運動とに分離して運動を生成し、後に合成することができる。

そこで、以下では、理解を容易にするために、サジタルプレーン上の運動に限定して制限手段の動作を説明するが、ラテラルプレーン上での運動に関しても同様である。

以上のように簡単化することにより、補正歩容により定まるコンプライアンス制御用目標床反力モーメントが床反力モーメント許容範囲内に存在すること（このことは補正歩容の運動による真のZMPが前記ZMP許容範囲に存在することを意味する）は、次式で表現される。ただし、 $M_{\max}$ は床反力モーメント許容範囲の上限値、 $M_{\min}$ は下限値である。

$$M_{\max} \geq \text{コンプライアンス制御用目標床反力モーメント} \geq M_{\min}$$



また、補正歩容の床反力水平成分が歩容補正用の床反力水平成分許容範囲内に存在することは、次式で表現される。ただし、 $F_{\max}$  は床反力水平成分許容範囲の上限値、 $F_{\min}$  は下限値である。

$$5 \quad F_{\max} \geq \text{補正歩容の床反力水平成分} \geq F_{\min} \quad \cdots \text{式 a 3 4}$$

また、本実施形態では、コンプライアンス制御用目標床反力モーメントは制限補正目標床反力モーメント  $M_{\text{Ltd}}$ 、補正歩容の床反力水平成分は制限補正目標床反力水平成分  $F_{\text{Ltd}}$  に一致またはほぼ一致する。

10 したがって、式 a 3 3 および式 a 3 4 は、近似的にそれぞれ次式 a 3 5 および式 a 3 6 に変換される。

$$M_{\max} \geq M_{\text{Ltd}} \geq M_{\min} \quad \cdots \text{式 a 3 5}$$

$$F_{\max} \geq F_{\text{Ltd}} \geq F_{\min} \quad \cdots \text{式 a 3 6}$$

15

図 5 2 に示す、横軸に床反力水平成分の X 軸方向成分（前後軸方向成分）、縦軸に床反力モーメントの Y 軸まわり成分（左右軸まわり成分）をとった座標系において、制限補正目標床反力水平成分  $F_{\text{Ltd}}$  と制限補正目標床反力モーメント  $M_{\text{Ltd}}$  の組（ $F_{\text{Ltd}}$ ,  $M_{\text{Ltd}}$ ）を座標系上の点  
20 とすると、式 a 3 5、式 a 3 6 を満足する点の集合（許容範囲）は、図 5 2 の長方形の境界およびその内部である。

図 5 2 の白丸（同図では、白丸と後述の黒丸とが重なっている）のように、無制限時補正目標床反力モーメント  $M_{\text{In}}$  が床反力モーメント許容範囲内に存在し、かつ、無制限時補正目標床反力水平成分  $F_{\text{In}}$  が床  
25 反力水平成分許容範囲内に存在している場合、すなわち、床反力モーメント許容範囲と床反力水平成分許容範囲で囲まれた長方形の範囲内に点

(Fin, Min) が存在している場合には、同図の黒丸で示す如く、Mltd は無制限時補正目標床反力モーメント Min にし、Fltd は無制限時補正目標床反力水平成分 Fin にする。当然のごとく、このようにするだけで、式 a 3 5 と式 a 3 6 が成立する。すなわち、コンプライアンス制御用目標床反力モーメントが床反力モーメント許容範囲内に存在し、かつ補正歩容の床反力水平成分が床反力水平成分許容範囲内に存在する。しかも、無制限時補正目標床反力モーメント Min、無制限時補正目標床反力水平成分 Fin に制限をかけずに（修正せずに）そのまま Mltd、Fltd として出力されるので、前記補正用摂動モデル上体位置と前記補正用摂動モデル上体姿勢角を適切に安定化し、発散を防止することができる。

図 5 3 ～図 5 5 の白丸のように、無制限時補正目標床反力モーメント Min が床反力モーメント許容範囲内に存在していないか、あるいは、無制限時補正目標床反力水平成分 Fin が床反力水平成分許容範囲内に存在していない場合、すなわち、床反力モーメント許容範囲と床反力水平成分許容範囲とで囲まれた長方形の範囲に点 (Fin, Min) が存在していない場合には、次のように Mltd と Fltd とが決定される。

まず、Mltd および Fltd の決定法を説明する前に、その決定における方針を説明する。

単に、Mltd を無制限時補正目標床反力モーメント Min にし、Fltd を無制限時補正目標床反力水平成分 Fin にすると、コンプライアンス制御用目標床反力モーメントが床反力モーメント許容範囲内に存在しない、あるいは、補正歩容の床反力水平成分が床反力水平成分許容範囲内に存在しなくなる。この時の上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント Mpf と上体姿勢角補正用摂動モデル安定化モーメント Mrf は前記式 a 2 0 および式 a 2 1 において、Mltd に Min、Fltd に Fin を代入する

ことで得られる。コンプライアンス制御用目標床反力モーメントが床反力モーメント許容範囲内に存在し、かつ補正歩容の床反力水平成分が床反力水平成分許容範囲内に存在するためには、このようにして得られた Mpf または Mrf を変更する必要がある。この際、本実施形態では、Mrf が上体姿勢角補正用摂動モデル安定化モーメント要求値 Mrfdmd にできる限り一致すること、すなわち、Mrf の Mrfdmd からの修正が最小になることを優先させる。

この理由を以下に述べる。

上体姿勢角補正用摂動モデル 203 で補正できる床反力モーメントは、比較的小さく、大きなモーメントを補正しようとする、上体姿勢角が大きく変動する。したがって、逆フルモデル 201 を用いた単純化モデル歩容の補正は、できる限り上体水平位置補正用摂動モデル 202 の動きを単純化モデル歩容に加えることによって行なうことが望ましい。そして、上体水平位置補正用摂動モデル 202 の動きで補正しきれない場合に上体姿勢角補正用摂動モデル 203 の動きを単純化モデル歩容に加えることによって該単純化モデル歩容を補正するのが望ましい。故に、上体姿勢角補正用摂動モデル 203 を復元させる（基準上体姿勢角に復元させる）ことを、上体水平位置補正用摂動モデル 202 を復元させる（上体水平位置を安定な位置に復元させる）ことよりも優先するのが望ましい。すなわち、上体姿勢角補正用摂動モデル 203 を復元させるための操作量である Mrf が上体姿勢角補正用摂動モデル安定化モーメント要求値 Mrfdmd にできる限り一致することを優先させることが望ましい。

さて、Mrf が上体姿勢角補正用摂動モデル安定化モーメント要求値 Mrfdmd に一致するためには、式 a 20 と式 a 21 とにおいて、Mltd に Min、Fltd に Fin を代入することで得られた Mpf と Mrf の内で、

Mrf は変更されずに、Mpf だけが変更されなければならない。

ここで、Fltd の変更量を  $\Delta F$  とし、Mltd の変更量を  $\Delta M$  とする。つまり、次式のように Fltd と Mltd を変更するものとする。

$$5 \quad \text{Fltd} = \text{Fin} + \Delta F \quad \dots \text{式 a 3 7}$$

$$\text{Mltd} = \text{Min} + \Delta M \quad \dots \text{式 a 3 8}$$

ところで、前記式 a 2 0 および式 a 2 1 より、次式の関係が得られる。

$$10 \quad \text{Mrf} = \text{Mltd} - \text{Mdmd} - (\text{Fltd} - \text{Ffull} - \text{F0}) * h \quad \dots \text{式 a 3 9}$$

上記式 a 3 7 ~ 式 a 3 9 から明らかなように、次式が成立していれば、Mrf は変更されない。つまり、次式が成立していれば、Mrf は、 $\text{Fltd} = \text{Fin}$  且つ  $\text{Mltd} = \text{Min}$  とした場合と同じになる。

15

$$\Delta M = \Delta F * h \quad \dots \text{式 a 4 0}$$

以上より、 $\Delta F$  および  $\Delta M$  は、上記式 a 4 0 を満足しなければならない。

20 また、その上で、Mpf が上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値 Mpfdmd にできる限り近いことが望ましいので、変更量  $\Delta F$  (または  $\Delta M$ ) の絶対値ができる限り小さくなるように決定する。さらに式 a 3 7、式 a 3 8 を用いて、Fltd と Mltd とを決定する。これにより、少なくとも前記補正用摂動モデル上体姿勢角  $\theta_c$  を適切に安定化して発散を防止することができ、またその上で前記補正用摂動モデル

25 上体水平位置  $X_c$  を可能な範囲で安定化して発散を防止することができ

る。

このようにして決定された Fltd と Mltd の組を、図 5 3、図 5 4 において黒丸点 (Fltd, Mltd) で表すと、黒丸点は、白丸点 (Fin, Min) を通る、傾きが上体並進モード床反力比率  $h$  である直線と、式 a 3 5、式 a 3 6 で表される許容範囲の境界との交点の中で、最も白丸点 (Fin, Min) に近い点となる。

補足すると、上記直線は、式 a 3 7、式 a 3 8、式 a 4 0 を満足する点 (Fltd, Mltd) の集合を意味する。また、白丸点の状態から、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  だけを変更すると、  
10 Mltd の変更量  $\Delta M$  と Fltd の変更量  $\Delta F$  の比が上体並進モード床反力比率  $h$  となることから、上記直線が、(Fltd, Mltd) を (Fin, Min) に一致させた状態から上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  だけを変更した場合の (Fltd, Mltd) の組の集合を意味することがわかる。

15 ただし、図 5 5 のように、式 a 3 5、式 a 3 6、式 a 3 7、式 a 3 8、式 a 4 0 を満足する Fltd と Mltd が存在しない場合には、次のように Fltd と Mltd とが決定される。この場合には、 $M_r$  を変更しないことをあきらめ、 $M_r$  の変更量ができる限り小さくなるように考慮する。

そこで、式 a 4 0 の代わりに式 4 1 が用いられる。

20

$$\Delta M = \Delta F * h + \Delta M_{p2} \quad \cdots \text{式 a 4 1}$$

Fltd と Mltd は、式 a 3 5、式 a 3 6、式 a 3 7、式 a 3 8、式 a 4 1 を満足するように決定される。ただし、 $\Delta M_{p2}$  が 0 に近いほど、 $M_r$  の変更量が小さくなるので、 $\Delta M_{p2}$  の絶対値が最小となるように決定  
25 する。また、これらの条件を満足した上で、 $M_p$  が上体水平位置補正用

振動モデル安定化モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  にできる限り近いことが望ましいので、 $\Delta F$  の絶対値ができる限り小さくなるように決定する。これにより、少なくとも前記補正用振動モデル上体姿勢角  $\theta_c$  を可能な範囲で安定化して発散を防止し、またその上で、前記補正用振動モデル  
5 上体水平位置  $X_c$  を可能な範囲で安定化して発散を防止することができる。

このようにして決定された  $F_{ltd}$  と  $M_{ltd}$  との組を、図 55 において黒丸点 ( $F_{ltd}$ ,  $M_{ltd}$ ) で表すと、黒丸点は、式 a 35、式 a 36 で表される許容範囲の長方形の境界線の頂点 (許容範囲の上限および下限を表す 4 本の線の交点) のうちで (より一般的には、許容範囲の境界線上  
10 の点のうちで)、白丸点 ( $F_{in}$ ,  $M_{in}$ ) を通る、傾きが上体並進モード床反力比率  $h$  である直線に最も近い点となる。

以上のごとく、目標 ZMP まわりの制限補正目標床反力モーメント  $M_{ltd}$  と制限補正目標床反力水平成分  $F_{ltd}$  とが決定される。

15 尚、補足すると、床反力鉛直方向成分が 0 の時 (走行歩容の空中期) には、式 a 35、式 a 36 の上限値  $M_{max}$ 、 $F_{max}$  および下限値  $M_{min}$ 、 $F_{min}$  は 0 となるので、目標 ZMP まわりの制限補正目標床反力モーメント  $M_{ltd}$  と制限補正目標床反力水平成分  $F_{ltd}$  は共に 0 となる。

以上が S 3038 の処理の詳細である。

20 ここで、本実施形態の各変数を前記第 2 実施形態で説明した各変数に以下のように対応させることとする。すなわち、

a) 上体姿勢角補正用振動モデル制御則 207 の出力である上体姿勢角補正用振動モデル安定化モーメント要求値  $M_{rfdmd}$  を、モデル上体姿勢角安定化床反力モーメント要求値に、

25 b) 上体水平位置補正用振動モデル制御則 206 の出力である上体水平位置補正用振動モデル安定化モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  を、モデル上

体水平位置安定化床反力モーメント要求値に、

c) 上体姿勢角補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{rf}$  を、モデル上体姿勢角安定化床反力モーメントに、

d) 上体水平位置補正用モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  を、モデル上体  
5 水平位置安定化床反力モーメントに、対応させることとする。

上記対応関係を考慮しつつ、本実施形態で生成される修正歩容が、前記式 d 2 7 および前記復元条件を満足することを以下に証明する。

図 4 9 からわかるように、修正歩容の運動は、単純化モデル歩容の運動に上体水平位置補正用摂動モデル 2 0 2 の上体運動と上体姿勢角補正用摂動モデル 2 0 3 の上体運動を加えたものになっている。また、フルモデル 2 0 1 の動力学から見ると、単純化モデル歩容の運動によって発生する目標 ZMP まわりに発生する床反力は、フルモデル床反力モーメント  $M_{full}$  であり、上体水平位置補正用摂動モデル 2 0 2 の上体運動が発生する床反力は、上体水平位置補正用摂動モデルモーメント  $M_p$  であり、上体姿勢角補正用摂動モデル 2 0 3 の上体運動が発生する床反力は上体姿勢角補正用摂動モデルモーメント  $M_r$  である。

したがって、修正歩容の運動が発生する床反力モーメント、すなわちモデル操作床反力モーメントは、次式となる。

$$\begin{aligned} & \text{モデル操作床反力モーメント} \\ & = \text{フルモデル床反力モーメント} \\ & \quad + \text{上体水平位置補正用摂動モデルモーメント } M_p \\ & \quad + \text{上体姿勢角補正用摂動モデルモーメント } M_r \end{aligned}$$

……式 d 3 1

また、図 4 9 からわかるように、以下の式が成立する。

170

上体水平位置補正用摂動モデルモーメント  $M_p$   
 = 上体水平位置補正用モデル安定化モーメント  $M_{pf}$   
 - フルモデル床反力モーメント

……式 d 3 2

5

また、上体姿勢角補正用摂動モデルモーメント  $M_r$  は上体姿勢角補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{rf}$  と一致させている。すなわち、次式が成立する。

10 上体姿勢角補正用摂動モデルモーメント  $M_r$   
 = 上体姿勢角補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{rf}$

……式 d 3 3

したがって、式 d 3 1、式 d 3 2 および式 d 3 3 より次式が成立する。

15 モデル操作床反力モーメント  
 = 上体水平位置補正用モデル安定化モーメント  $M_{pf}$   
 + 上体姿勢角補正用モデル安定化モーメント  $M_{rf}$

……式 d 3 4

式 d 3 4 は、第 2 実施例の式 d 3 0 に対応する式となっている。

20 補足すると、図 4 9 において、上体水平位置補正用モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  と上体姿勢角補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{rf}$  を共に 0 とした場合に生成される歩容は、目標 ZMP まわりのモーメントが 0 である。したがって、この場合に生成された歩容が元歩容に相当する。  
 またさらに、図 4 9 からわかるように、次式が成立する。

25



上体姿勢角補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{rf}$

= 制限床反力モーメント  $M_{ltd}$

－ 上体水平位置補正量モデル安定化モーメント  $M_{pf}$

－ 補償全床反力モーメント  $M_{dmd}$

5

……式 d 3 5

したがって、式 d 3 4 および式 d 3 5 より次式が成立する。

制限床反力モーメント  $M_{ltd}$

10

= モデル操作床反力モーメント + 補償全床反力モーメント  $M_{dmd}$

……式 d 3 6

15

ところで、前記制限手段（制御処理部 2 1 1）によって、制限補正目標床反力モーメント  $M_{ltd}$  は、床反力モーメント許容範囲を越えないように決定される。したがって、式 d 3 6 の右辺も床反力モーメント許容範囲を越えない。すなわち、前記復元条件 1 を満足する。

さらに、本実施形態では、制限床反力モーメント  $M_{ltd}$  をコンプライアンス制御用目標床反力モーメントとするので、上記式 d 3 6 によって、前記式 d 2 7 が成立する。

20

一方、前述のように制限手段（制限処理部 2 1 1）によって、制限補正目標床反力水平成分  $F_{ltd}$  は、床反力水平成分許容範囲内を越えないように決定される。

25

また、制限補正目標床反力水平成分  $F_{ltd}$  から上体水平位置補正用摂動モデルモーメント  $M_p$  を決定するまでの演算処理によれば、修正歩容の床反力水平成分は、制限補正目標床反力水平成分  $F_{ltd}$  にほぼ一致する。

したがって、修正歩容の床反力水平成分は、床反力水平成分許容範囲を越えない。すなわち、前記復元条件 2 を満足する。

また、制限手段（制限処理部 211）の処理では、復元条件 1 および 2 を満足した上で可能な限り、制限床反力モーメント  $M_{ltd}$  から上体水平位置補正用モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  と補償全床反力モーメント  $M_{dmd}$  とを減じたモーメントが、上体姿勢角補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{rfdmd}$  に一致または近い値になるように決定される。

したがって、復元条件 1 および 2 を満足した上で可能な限り、上体姿勢角補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{rf}$  は、上体姿勢角補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{rfdmd}$  に一致または近い値になるように決定される。すなわち、前記復元条件 3 を満足する。

また、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  から上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  を決定するまでの演算処理によれば、制限手段（制限処理部 211）によって、復元条件 1、2 および 3 を満足した上で可能な限り、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_p$  は、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  に一致または近い値になるように決定される。すなわち、前記復元条件 4 を満足する。

また、制限手段（制限処理部 211）は、入力が連続であれば、出力も連続となる。したがって、前記復元条件 5 を満足する。

以上のごとく、本実施形態では、前記復元条件すべてを満足する。したがって、前記第 2 実施形態と同様の作用効果を奏することができる。

さらに、第 2 実施形態の作用効果に加え、前記復元条件を満足するように上体水平位置、上体姿勢角を決定する際に、演算量を比較的少ないものとすることができる。

ここで、前述した第3実施形態と本発明との対応関係を説明しておく。  
第3実施形態は、前記第1～14発明、第16～23発明に対応している。この場合、第3実施形態では、ロボット1の上体姿勢角がロボットの姿勢の状態量に相当し、床反力水平成分が制限対象量に相当し、上体  
5 姿勢角補正用摂動モデルモーメント  $M_r$  および上体水平位置補正用摂動モデルモーメント  $M_p$  が目標床反力の修正操作量に相当し、補償全床反力モーメント  $M_{dmd}$  が第1要求操作量に相当し、コンプライアンス制御用床反力モーメントが実床反力操作量に相当し、上体位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  および上体姿勢角補正用摂  
10 動モデル安定化モーメント要求値  $M_{rfdmd}$  が第2要求操作量に相当する。また、動力学モデルとして、単純化モデル200（図10のモデル）と逆フルモデル201と上体姿勢補正用摂動モデル203と、上体水平位置補正量摂動モデル202とが用いられ、単純化モデル200、  
上体姿勢補正用摂動モデル203および上体水平位置補正量摂動モデル  
15 202の運動は、上体並進モードと上体回転モードを含んでいる。また、歩容パラメータは図48のS3028の処理で修正歩容の状態量に応じて適宜修正される。

次に本発明の第4実施形態を以下に説明する。第4実施形態に係る装置の補正手法は、前記第3実施形態のものと歩容生成装置100の処理  
20 （図48のS3038の処理）のみが相違するものであり、フルモデルフィードバック補正型である。また、逆動力学フルモデル（逆フルモデル）を用いる手法で、かつ単純化モデル歩容の入力を補正しない手法であり、かつ摂動モデルを用いる手法である。

図56は、この第4実施形態に係る装置の動作、具体的には、図48  
25 フローチャートのS3038の歩容の修正手法を説明する機能ブロック図である。ただし、図56の単純化モデル200は、前記第3実施形態

と同様、単に動力学モデルだけでなく、図48のS3010からS3034の処理、すなわち単純化モデル歩容瞬時値の算出（決定）処理を表す。したがって、図56において、単純化モデル200から先の部分がS3038の処理に相当する。なお、図56の機能部分のうち、第3実施形態に係る図49と同一の機能分については、図49と同一の参照符号を用い、詳細な説明を省略する。

S3038の処理以外の構成は第3実施形態と同じであるので説明を省略し、以下に図56を用いてS3038の処理を詳細に説明する。

S3038では、まず、前述のごとく図48のS3032で求めた単純化モデル歩容の目標上体水平位置の瞬時値（現在時刻 $t$ の制御周期で求めた仮瞬時値）に、前回制御周期（時刻 $t - \Delta t$ ）で後述のごとく算出した補正用摂動モデル上体水平位置 $X_c$ を演算部205により加えることにより、最終的な目標上体水平位置（補正目標上体水平位置）が求められる。また、図48のS3032で求めた単純化モデル歩容の目標上体姿勢角の瞬時値（現在時刻 $t$ の制御周期で求めた仮瞬時値）に、前回制御周期（時刻 $t - \Delta t$ ）で算出した後述する補正用摂動モデル上体姿勢角 $\theta_c$ を演算部204により加えることにより、最終的な目標上体姿勢角（補正目標上体姿勢角）が求められる。そして、これらの補正目標上体水平位置および補正目標上体姿勢角が、それぞれ上体水平位置および上体姿勢角の最終的な目標瞬時値として出力される。

すなわち、前記式a24、式a25により、補正目標上体水平位置と補正目標上体姿勢角とが求められる。

次いで、上記の如く単純化モデル歩容を補正して得られた目標上体水平位置（補正目標上体水平位置）、目標上体姿勢角（補正目標上体姿勢角）、および前述のごとく得られた単純化モデル歩容の目標重心位置、目標足平位置姿勢、目標腕姿勢などの運動変数の瞬時値と目標ZMPの

瞬時値とを、前記逆動力学フルモデル201に入力し、その入力された運動変数で表される運動に釣り合う（すなわち運動によって逆フルモデル201が発生する）床反力水平成分と目標ZMPまわりの床反力モーメントとが算出される。従って、本実施形態では、逆フルモデル201

5 には、単純化モデル上体水平位置および上体姿勢角に加えて、補正用摂動モデル上体水平位置  $X_c$  と補正用摂動モデル上体姿勢角  $\theta_c$  とが追加的に入力される。以降、第3実施形態と同様、逆フルモデル201により算出された床反力水平成分、床反力モーメントをそれぞれフルモデル床反力水平成分  $F_{full}$ 、フルモデル床反力モーメント  $M_{full}$  と呼ぶ。

10 フルモデル床反力水平成分  $F_{full}$  とフルモデル床反力モーメント  $M_{full}$  とのうち、フルモデル床反力水平成分  $F_{full}$  は、補正目標床反力水平成分（現在時刻  $t$  における床反力水平成分の最終的な目標瞬時値）として出力される。

すなわち、以下の式により、補正目標床反力水平成分が決定されて出力される。

15

補正目標床反力水平成分 = フルモデル床反力水平成分  $F_{full}$

…式 a 4 8

20 以上の処理からわかるように、本実施形態では、フルモデル歩容は、単純化モデル歩容に上体水平位置補正用摂動モデル202の挙動と上体姿勢角補正用摂動モデル203の挙動とを加えたものになる。したがって、次式が成立する。ただし、単純化モデル床反力水平成分は、単純化モデル歩容の運動によって発生する床反力を逆フルモデル201を用い

25 て算出したものの並進力水平成分である。

フルモデル床反力水平成分  $F_{full}$

= 単純化モデル床反力水平成分

+ 上体水平位置補正用摂動モデル床反力水平成分  $F_p$

+ 上体姿勢角補正用摂動モデル床反力水平成分  $F_r$

5

…式 a 5 1

次いで、上体水平位置補正用摂動モデル制御則 2 0 6 により、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  が決定される。本実施形態における上体水平位置補正用摂動モデル制御則 2 0 6 は、  
 10 特願 2 0 0 1 - 1 3 3 6 2 1 号で本願出願人が提案した如く、設定される。例えば、次式のように該制御則 2 0 6 が決定される。

上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{pfdmd}$

=  $K_{pg} \times \text{重心差} + K_{vg} \times \text{補正用摂動モデル上体水平速度 } dX_c/dt$

15

…式 a 5 2

ただし、重心差は、次式で求められる。

重心差 = フルモデル重心水平位置 - 単純化モデル重心水平位置

…式 a 5 3

20 式 a 5 2 における  $K_{pg}$ 、 $K_{vg}$  はフィードバック制御のゲインであり、フルモデル重心水平位置、単純化モデル重心水平位置および補正用摂動モデル上体水平速度  $dX_c/dt$  は、それぞれ、前回（時刻  $t - \Delta t$ ）に後述のごとく算出したフルモデル歩容瞬時値の重心水平位置、単純化モデル歩容瞬時値の重心水平位置（単純化モデル歩容の瞬間姿勢を基に単純  
 25 化モデルを用いて計算される重心水平位置  $XGs$ ）、および補正用摂動モデル上体水平速度  $dX_c/dt$  である。

即ち、フルモデル重心水平位置から単純化モデル重心水平位置を減算して得た重心差と摂動モデルの状態量のひとつである摂動モデル上体速度とに基づいて摂動モデル制御用フィードバック量（操作量）を演算するようにした。かかる摂動モデル制御則により、前記重心差の時間的平均値を、ほぼ0に制御することができる。

次いで、上体姿勢角補正用摂動モデル制御則207により、上体姿勢補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $Mrfdmd$  が決定される。これは、第1実施形態と同様の制御則を用いれば良い。従って、該制御則207としては、例えば前記式 a 1 1 が用いられる。

10 次いで、無制限時補正目標床反力モーメント  $Min$  が  $Min$  演算部209により求められる（推定される）。無制限時補正目標床反力モーメント  $Min$  は、第3実施形態と同様、前記制約（ZMP制約条件および床反力水平成分制約条件）を無視して、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $Mpf$  を上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $Mpfdmd$  に一致させ、かつ、上体姿勢角補正用摂動モデル安定化モーメント  $Mrf$  を、上体姿勢角補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $Mrfdmd$  に一致させると共に、目標ZMPまわりの目標床反力モーメントとしてのコンプライアンス制御用目標床反力モーメントを補償全床反力モーメント  $Mdmd$  と  $Mpf$  と  $Mrf$  との総和に一致させた場合

15 20 合に、目標ZMPまわりに発生する床反力モーメントである。

無制限時補正目標床反力モーメント  $Min$  は、第3実施形態と同様、前記式 a 1 3 の演算によって求められる。すなわち、無制限時補正目標床反力モーメント  $Min$  は、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $Mpfdmd$  と上体姿勢角補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $Mrfdmd$  と補償全床反力モーメント  $Mdmd$  とを加算すること

25 により得られる。

さらに、Fin 演算部 210 により、無制限時補正目標床反力水平成分 Fin も求められる（推定される）。無制限時補正目標床反力水平成分 Fin は、第 3 実施形態と同様、前記制約（ZMP 制約条件および床反力水平成分制約条件）を無視して、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント Mpf を上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値 Mpfdmd に一致させ、かつ、上体姿勢角補正用摂動モデル安定化モーメント Mrf を、上体姿勢角補正用摂動モデル安定化モーメント要求値 Mrfdmd に一致させると共に、コンプライアンス制御用目標床反力モーメントを補償全床反力モーメント Mdmd と Mpf と Mrf との総和に一致させたとした場合に、逆フルモデル 201 が発生する床反力水平成分（Ffull に相当）である。

無制限時補正目標床反力水平成分 Fin は、第 3 実施形態とは異なり、次式により求められる。

15 無制限時補正目標床反力水平成分 Fin

= フルモデル床反力水平成分 Ffull

+ 1/h

\* (上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値 Mpfdmd

− 上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント Mpf)

20

…式 a 5 4

ただし、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント Mpf は前回値（時刻  $t - \Delta t$  での値）が用いられる。すなわち、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値 Mpfdmd と上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント Mpf の差を求め、上体水平位置補正用摂動モデルの入力を前記差だけ増加させることに起因するフルモデル床反力水平成分 Ffull の増加量を、前記差を上体並進モード床反力比率 h



で割ることにより推定する。さらに、これにフルモデル床反力水平成分  $F_{full}$  を加えることにより、無制限時補正目標床反力水平成分  $F_{in}$  が推定される。

次いで、第3実施形態と同様の制限手段（制限処理部211）によって、無制限時補正目標床反力モーメント  $M_{in}$  と無制限時補正目標床反力水平成分  $F_{in}$  とから、前記制約（ZMP制約条件および床反力水平成分制約条件）を満足するように、これらに制限を加えた値である（目標ZMPまわりの）制限補正目標床反力モーメント  $M_{ltd}$  と制限補正目標床反力水平成分  $F_{ltd}$  とが決定される。この処理手法は、第3実施形態と同一である。

本実施形態においても、コンプライアンス制御用目標床反力モーメントは制限補正目標床反力モーメント  $M_{ltd}$  に一致され、また、補正目標床反力水平成分は制限補正目標床反力水平成分  $F_{ltd}$  にほぼ一致するので、上記のごとく制限補正目標床反力モーメント  $M_{ltd}$  と制限補正目標床反力水平成分  $F_{ltd}$  を決定することによって、コンプライアンス制御用目標床反力モーメントおよび補正目標床反力水平成分は、それぞれZMP制約条件および床反力水平成分制約条件をほぼ満足する。

次いで、 $M_{pf}$  演算部215によって、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  が求められる。さらに詳細には、制限補正目標床反力水平成分  $F_{ltd}$  からフルモデル床反力水平成分  $F_{full}$  を減じた値にゲイン  $K_c$  を乗じたものを積分器215aにて積分し、さらに得られた積分値に上体並進モード床反力比率  $h$  を乗じることにより、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  が求められる。すなわち、次式により、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  が得られる。

180

$$M_{pf} = h * \int K_c(F_{ltd} - F_{full})dt \quad \dots \text{式 a 5 5}$$

次いで、Mrf 演算部 2 1 4 によって、制限補正目標床反力モーメント Mltd から上体水平位置補正用振動モデル安定化モーメント Mpf と補償  
5 全床反力モーメント Mdmd とを減じることにより、上体姿勢角補正用振動モデル安定化モーメント Mrf が求められる。すなわち、前記式 a 2 1 により、上体姿勢角補正用振動モデル安定化モーメント Mrf が得られる。

さらに、前記式 a 2 3 により、上体姿勢角補正用振動モデル床反力モーメント Mr が決定される。すなわち、Mrf 演算部 2 1 4 の出力である  
10 上体姿勢角補正用振動モデル安定化モーメント Mrf がそのまま上体姿勢角補正用振動モデル床反力モーメント Mr として決定される。

次いで、次式で定義されるフルモデル床反力モーメント誤差 Merr が  
Merr 演算部 2 1 6 により算出される。

15

フルモデル床反力モーメント誤差 Merr

=フルモデル床反力モーメント Mfull - 制限補正目標床反力モーメント Mltd

…式 a 5 6

20

次いで、Mp 演算部 2 1 7 により、次式に従って、上体水平位置補正用振動モデル床反力モーメント Mp が求められる。

$$M_p = M_{pf} - \int K_m * M_{err} dt \quad \dots \text{式 a 5 7}$$

25

すなわち、フルモデル床反力モーメント誤差 Merr に積分ゲイン Km

を乗じた値を積分器 217a にて積分すると共に、その積分値の符号を反転する。さらに、該積分器 217a の出力を上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  に加えることにより、上体水平位置補正用摂動モデル床反力モーメント  $M_p$  が求められる。

- 5 次いで、上体水平位置補正用摂動モデル床反力モーメント  $M_p$  を上体位置補正用摂動モデル 202 に入力して、入力された床反力モーメントに釣り合う補正用摂動モデル上体位置  $X_c$  が算出される。

- また、上体姿勢角補正用摂動モデル床反力モーメント  $M_r$  を上体姿勢角補正用摂動モデル 203 に入力して、入力された床反力モーメントに  
10 釣り合う補正用摂動モデル上体姿勢角  $\theta_c$  が算出される。

求めた補正用摂動モデル上体位置  $X_c$ 、補正用摂動モデル上体姿勢角  $\theta_c$  および上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  は、前述のごとく次回制御周期（時刻  $t + \Delta t$ ）において、前回値として用いられる。

- 15 残余の構成および処理は、第 3 実施形態と同一である。この第 4 実施形態によれば、第 3 実施形態と同様の作用効果を奏することができる。

- ここで、前述した第 4 実施形態と本発明との対応関係を説明しておく。  
第 4 実施形態は、前記第 1 ～ 10 発明、第 12 ～ 17 発明に対応している。この場合、第 4 実施形態では、ロボット 1 の上体姿勢角がロボットの姿勢の状態量に相当し、床反力水平成分が制限対象量に相当し、上体  
20 姿勢角補正用摂動モデルモーメント  $M_r$  および上体水平位置補正用摂動モデルモーメント  $M_p$  が目標床反力の修正操作量に相当し、補償全床反力モーメント  $M_{dmd}$  が第 1 要求操作量に相当し、コンプライアンス制御用床反力モーメントが実床反力操作量に相当し、上体水平位置補正  
25 用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  および上体姿勢角補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{rfdmd}$  が第 2 要求操作量に相

当する。また、動力学モデルとして、単純化モデル 200（図 10 のモデル）と逆フルモデル 201 と上体姿勢補正用摂動モデル 203 と、上体水平位置補正量摂動モデル 202 とが用いられ、単純化モデル 200、上体姿勢補正用摂動モデル 203 および上体水平位置補正量摂動モデル 202 の運動は、上体並進モードと上体回転モードを含んでいる。また、歩容パラメータは図 48 の S3028 の処理で適宜修正される。

次に、本発明の第 5 実施形態を図 57 および図 58 を参照して説明する。第 5 実施形態は、前記第 3 および第 4 実施形態で用いた逆動力学フルモデル（逆フルモデル）201 に代えて、順動力学モデル（より正確には擬似順動力学モデル）を用いて歩容を修正しつつ生成する手法である。

図 57 は、この第 5 実施形態に係る装置の動作を説明する機能ブロック図である。同図 57 に示すように、本実施形態では、擬似順フルモデル（擬似順動力学フルモデル）222 を備えている。

この擬似順フルモデル 222 は、上体水平位置安定化モーメント要求値  $M_{pfdmd}$ 、上体姿勢角安定化モーメント要求値  $M_{rfdmd}$ 、目標 ZMP、目標床反力鉛直成分および補償全床反力モーメント  $M_{dmd}$  と、目標足平位置姿勢および目標腕姿勢など上体 24 を除く部位の運動状態とを入力として、目標上体鉛直位置、目標上体水平位置、目標上体姿勢角、目標 ZMP まわりの目標床反力モーメントとしてのコンプライアンス制御用目標床反力モーメント、および目標床反力水平成分を出力するモデルである。なお、擬似順フルモデル 222 の入力は、前記図 47 を参照して説明した如く、歩容パラメータ決定部 100a で決定される歩容パラメータを基に、目標瞬時値発生部 100b により生成される。

上記擬似順フルモデル 222 は、具体的には図 58 の機能ブロック図で表される。なお、この機能ブロック図で前記第 4 実施形態の図 56 と

同一機能部分については、図56と同一の参照符号を用いている。

ここで、同図58の単純化モデル200は、単に動力学モデルだけでなく、前述の図48のS3010からS3034の処理、すなわち単純化モデル歩容瞬時値の算出（決定）処理を表す。また、S3032の今回歩容瞬時値（単純化モデル歩容瞬時値）の算出（決定）処理においては、前記第3実施形態で説明したように目標ZMPまわりのモデル操作床反力モーメントを0として歩容の瞬時値を生成した上で、さらに第3実施形態において述べた上体姿勢角補正用摂動モデルモーメント  $M_r$  に相当する上体姿勢角補正用摂動モデルモーメント  $M_r$ （前回値）を発生する上体回転モードの摂動運動を付加すると共に、第3実施形態において述べた上体水平位置補正用摂動モデルモーメント  $M_p$  に相当する単純化モデル上体水平位置補正用モーメント  $M_p$ （前回値）を発生する上体並進モードの摂動運動を付加する。これにより、単純化モデル200が出力する歩容の瞬時値を補正する。

より具体的に説明すると、本実施形態における図48のS3032の処理においては、そのサブルーチン処理である図40のS1014において、単純化モデル200で求めた上体水平加速度に、前記式03の右辺第2項を  $M_p$ （前回値）に等しいとした式、すなわち  $M_p = m_b \cdot (Z_b - Z_{zmp}) \cdot (d^2 X_b / dt^2)$  という式に基づいて求められる上体水平加速度  $(d^2 X_b / dt^2)$  を摂動分として加えてなる上体水平加速度を今回歩容の初期から現在時刻  $t$  まで2階積分することにより、現在時刻  $t$  における上体水平位置の瞬時値が求められる。また、図40のS1014において、単純化モデル200で求めた上体姿勢角加速度に、前記式03の右辺第7項を  $M_r$ （前回値）に等しいとした式、すなわち、 $M_r = J \cdot d^2 \theta_{by} / dt^2$  という式に基づいて求められる上体姿勢角加速度  $(d^2 \theta_{by} / dt^2)$  を摂動分として加えてなる上体姿勢角加速度を今回歩容の初期から現在時刻  $t$

まで2階積分することにより、現在時刻  $t$  における上体姿勢角の瞬時値が求められる。

図58において、単純化モデル200から先の部分がS3038の処理に相当する処理を実行する部分である。以下に図58を用いてS3038の処理を詳細に説明する。

S3038では、まず、S3032において上記の如く単純化モデル上体水平位置補正用モーメント  $M_p$ （詳しくは時刻  $(t - \Delta t)$  の制御周期での前回値）を基に補正された単純化モデル水平上体位置が目標上体水平位置（時刻  $t$  での上体水平位置の最終的な目標瞬時値）として出力される。またさらに、上体姿勢角補正用摂動モデルモーメント  $M_r$ （詳しくは時刻  $(t - \Delta t)$  の制御周期での前回値）を基に補正された単純化モデル上体姿勢角が目標上体姿勢角（時刻  $t$  での上体姿勢角の最終的な目標瞬時値）として出力される。

すなわち、式a100、式a101により、最終的な目標上体水平位置と目標上体姿勢角とが決定される。

目標上体水平位置 = 単純化モデル上体水平位置 …式a100

目標上体姿勢角 = 単純化モデル上体姿勢角 …式a101

次いで、目標上体水平位置（すなわち単純化モデル上体水平位置）、目標上体姿勢角（すなわち単純化モデル上体姿勢角）、および前述のごとく得られた単純化モデル歩容の目標全体重心位置、目標足平位置姿勢、目標腕姿勢などの運動変数の瞬時値と目標ZMPの瞬時値とを、前記逆動力学フルモデル（逆フルモデル）201に入力し、入力された運動変数で表される運動に釣り合う（すなわち運動によって逆フルモデル201が発生する）床反力水平成分と目標ZMPまわりの床反力モーメント

とが算出される。以降、第4実施形態と同様、これらの算出された床反力水平成分及び床反力モーメントをそれぞれフルモデル床反力水平成分  $F_{full}$ 、フルモデル床反力モーメント  $M_{full}$  と呼ぶ。

第4実施形態と同様、フルモデル床反力水平成分  $F_{full}$  は、目標床反力水平成分（時刻  $t$  での床反力水平成分の最終的な目標瞬時値）として出力される。

本実施形態では、上体姿勢角補正用摂動モデルと上体水平位置補正用摂動モデルとを備えないので、上体水平位置補正用摂動モデル制御則と上体姿勢角補正用摂動モデル制御則に相当する処理は、後述するように、第4実施形態とは異なる。

このことを除けば、上記処理以降、単純化モデル上体姿勢角補正用モーメント  $M_r$  と単純化モデル上体水平位置補正用モーメント  $M_p$  とを決定するまでは、第4実施形態において、上体姿勢角補正用摂動モデルモーメント  $M_r$  と上体水平位置補正用摂動モデルモーメント  $M_p$  とを決定する処理と同一の処理が実行される。すなわち、Min 演算部 209、Fin 演算部 210、制限処理部 211（制限手段）、Mpf 演算部 215、Merr 演算部 216、Mrf 演算部 217（= $M_r$  演算部）、及び  $M_p$  演算部 214 の処理は、前記第4実施形態と同一である。なお、本実施形態では、 $M_r$ 、 $M_p$  は、それぞれ第4実施形態における上体姿勢角補正用摂動モデルモーメント  $M_r$  と上体水平位置補正用摂動モデルモーメント  $M_p$  とにそれぞれ対応するものであるが、第4実施形態のように摂動モデルに入力するものではなく、単純化モデル 200 に入力するものである。このため、 $M_r$ 、 $M_p$  の名称を本実施形態では、単純化モデルを上体姿勢角補正用モーメント、単純化モデル上体水平位置補正用モーメントを称している。

上記のごとく求められた上体姿勢角補正用摂動モデルモーメント  $M_r$

と単純化モデル上体水平位置補正用モーメント  $M_p$  は、前述のごとく次回制御周期（時刻  $t + \Delta t$ ）に、単純化モデル歩容瞬時値の決定（生成）時に前回値として用いられる。

残余の構成及び処理は、第4実施形態と同一である。

- 5      以下に、上体姿勢角安定化モーメント要求値  $M_{rfdmd}$  と上体水平位置安定化モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  との決定処理について図57を参照して説明する。

- 10      図57に示すように、本実施形態では、前述したように擬似順フルモデル222に備える単純化モデル200とは別の単純化モデル223を備えている。この単純化モデル223は、本実施形態でのその機能は、前述した単純化モデル200と同一であり、単に動力学モデルだけでなく、前述の図48のS3010からS3034の処理、すなわち単純化モデル歩容瞬時値の算出（決定）処理を表すものである。なお、単純化モデル223は、実際上は、上体姿勢角の瞬時値と、上体水平位置の瞬時値とを決定できればよく、必ずしも図43のS3010からS3034の処理の全てを行なう必要はない。
- 15

以下に図57を用いて本実施形態における  $M_{pfdmd}$  および  $M_{rfdmd}$  の決定処理を詳細に説明する。

- 20      本実施形態においては、単純化モデル223を用いて生成される歩容と前記擬似順動力学フルモデル222を用いて前述の通り算出される歩容との間の上体水平位置および上体姿勢角のそれぞれの差が演算部224、225により求められる。そして、これらの差に応じて、これらの差が0に収束するようにPIDなどのフィードバック制御則によって上体水平位置安定化モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  および上体姿勢角安定化モーメント要求値  $M_{rfdmd}$  が決定される。すなわち、単純化モデル223による上体水平位置と擬似順フルモデル222による上体水平位置
- 25



との差に応じて、フィードバック制御則からなる上体水平位置安定化制御則 226 によって、 $M_{pfdmd}$  が求められる。また、単純化モデル 223 による上体姿勢角と擬似順フルモデル 222 による上体姿勢角との差に応じて、フィードバック制御則からなる上体姿勢角安定化制御則 227 によって、 $M_{rfdmd}$  が求められる。そして、この決定された  $M_{pfdmd}$  及び  $M_{rfdmd}$  が、前記擬似順動力学フルモデルにフィードバックされて入力される。

なお、本実施形態では、歩容生成装置 100 は、前記擬似順動力学フルモデル 222 への入力の一部である目標 ZMP、目標床反力鉛直成分、目標足平位置姿勢および目標腕姿勢などと、前記擬似順動力学フルモデル 222 からの出力である目標上体鉛直位置、目標上体水平位置、目標上体姿勢角、目標床反力水平成分およびコンプライアンス制御用目標床反力モーメントを最終的な今回歩容の目標瞬時値として出力する。

以上説明した第 5 実施形態によれば、前記第 4 実施形態と同様の作用効果を奏することができる。

ここで、前述した第 5 実施形態と本発明との対応関係を説明しておく。第 5 実施形態は、前記第 1 ～ 14 発明、第 16 ～ 23 発明に対応している。この場合、第 5 実施形態では、ロボット 1 の上体姿勢角がロボットの姿勢の状態量に相当し、床反力水平成分が制限対象量に相当し、単純化モデル上体姿勢角補正用モーメント  $M_r$  および単純化モデル上体水平位置補正用モーメント  $M_p$  が目標床反力の修正操作量に相当し、補償全床反力モーメント  $M_{dmd}$  が第 1 要求操作量に相当し、コンプライアンス制御用床反力モーメントが実床反力操作量に相当し、上体水平位置安定化床反力モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  および上体姿勢角安定化モーメント要求値  $M_{rfdmd}$  が第 2 要求操作量に相当する。また、動力学モデルとして、単純化モデル 200 および逆フルモデル 201 を含む擬似

順フルモデル 222 と、単純化モデル 223 とが用いられ、単純化モデル 200, 223 は、上体並進モードと上体回転モードとを含んでいる。また、歩容パラメータは図 48 の S3028 の処理で適宜修正される。

なお、前記第 5 実施形態では、上体姿勢角安定モーメント要求値  
5 Mrfdmd および上体水平位置安定化モーメント Mpfdmd を擬似順フルモデル 222 のみに入力するようにしたが、Mrfdm および Mpfdmd を単純化モデル 223 に入力するようにしてもよく、あるいは、単純化モデル 223 と擬似順フルモデル 222 とに分配・供給するようにしてもよい。

10 次に、本発明の第 6 実施形態を図 59 を参照して説明する。図 59 は、この発明の第 6 実施形態に係る装置の動作、具体的には、図 48 のフローチャートの S3038 の歩容の修正手法を説明する機能ブロック図である。なお、図 59 では、第 3 実施形態もしくは第 4 実施形態と同一機能部分については、図 49 又は図 56 と同一の参照符号を用いる。

15 第 6 実施形態においては、上体水平位置補正用摂動モデル 202 と上体姿勢角補正用摂動モデル 203 とを備える。また、2つの分配器 220, 221 を備える。

分配器 220, 221 を定義すると、いずれも、1入力2出力の伝達  
20 ブロックであり、入力に応じて、一方の出力を決定し（例えば、入力に周波数特性、不感帯特性、飽和特性などの信号処理を行って一方の出力を決定し）、2つの出力の和が入力に一致またはほぼ一致するように、他方の出力を決定する伝達ブロックである。

分配器 220 には、制限補正目標床反力モーメント Mltd から、上体  
25 水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント Mpf と補償全床反力モーメント Mdmd とを減じたもの（Mr 演算部 214 の出力）である上体姿勢角補正用モーメント Mr が入力され、上体姿勢角補正用摂動モデル 2

03に入力する上体姿勢角補正用振動モデル入力  $M_{ri}$  と、単純化モデル200に入力する単純化モデル上体姿勢角補正用モーメント  $M_{rs}$  とに分配される。この時、上体姿勢角補正用振動モデル入力  $M_{ri}$  と単純化モデル上体姿勢角補正用モーメント  $M_{rs}$  との和が上体姿勢角補正用モーメント  $M_r$  に一致するように、上体姿勢角補正用振動モデル入力  $M_{ri}$  と単純化モデル上体姿勢角補正用モーメント  $M_{rs}$  とが決定される（出力される）。

より具体的には、上体姿勢角補正用モーメント  $M_r$  に応じて、上体姿勢角補正用振動モデル入力  $M_{ri}$  が決定される。例えば、上体姿勢角補正用モーメント  $M_r$  を不感帯特性、飽和特性、あるいは周波数特性を持つ信号処理を通して、上体姿勢角補正用振動モデル入力  $M_{ri}$  が決定される。また、上体姿勢角補正用モーメント  $M_r$  から上体姿勢角補正用振動モデル入力  $M_{ri}$  を差し引いたものが、単純化モデル上体姿勢角補正用モーメント  $M_{rs}$  として決定される。さらに具体的に説明すると、本実施形態では、分配器220は、例えば、入力（上体姿勢角補正用モーメント  $M_r = M_{ltd} - M_{pf} - M_{dmd}$ ）をローパスフィルタに通してなる低周波成分（直流分）を単純化モデル上体姿勢角補正用モーメント  $M_{rs}$  として出力すると共に、その入力（上体姿勢角補正用モーメント  $M_r$ ）から  $M_{rs}$  を差し引いた成分が上体姿勢角補正用振動モデル入力  $M_{ri}$  として出力される。この場合、低周波成分（直流分）である単純化モデル上体姿勢角補正用モーメント  $M_{rs}$  に関しては、不感帯特性を持たせておき、上記ローパスフィルタの出力が、ある所定値を中心とする所定範囲内に存在する状態では、 $M_{rs}$  が該所定値（例えば0）に維持されるようにしておく。

分配器220の出力である上体姿勢角補正用振動モデル入力  $M_{ri}$  は、前記上体姿勢角補正用振動モデル203に入力され、上体姿勢角補正用

振動モデル 203 により補正用振動モデル上体姿勢角  $\theta_c$  が決定される。

分配器 220 のもうひとつの出力である単純化モデル上体姿勢角補正用モーメント  $M_{rs}$  は単純化モデル 200 に入力される。これは、前記第 5 実施形態における図 58 において、単純化モデル上体姿勢角補正用

5 モーメント  $M_r$  を単純化モデル 200 に入力することに相当するものである。

分配器 221 においては、フルモデル床反力モーメント誤差  $M_{err}$  にゲイン  $K_m$  を乗じた値を積分器 217a によって積分し、さらに符号を反転した値を入力とする。

10 分配器 221 の入力、分配器 220 と同様、単純化モデル 200 に入力する単純化モデル上体水平位置補正用モーメント  $M_{ps}$  と、上体水平位置補正用振動モデル 202 に入力する誤差補正モーメント  $M_e$  とに分配される。より具体的には、積分器 217a の出力に応じて、誤差補正モーメント  $M_e$  が決定される。例えば、積分器 217a の出力（分配器 220 の入力）を不感帯特性、飽和特性、あるいは周波数特性を持つ

15 信号処理を通して、誤差補正モーメント  $M_e$  が決定される。また、積分器 217a の出力から、誤差補正モーメント  $M_e$  を差し引いたものが、単純化モデル上体姿勢角補正用モーメント  $M_{rs}$  として決定される。さらに具体的に説明すると、本実施形態では、分配器 221 は、例えば、

20 入力（積分器 217a の出力）をローパスフィルタに通してなる低周波成分（直流分）を単純化モデル上体水平位置補正用モーメント  $M_{ps}$  として出力すると共に、その入力（積分器 217a の出力）から  $M_{ps}$  を差し引いた成分を誤差補正モーメント  $M_e$  として出力する。この場合、低周波成分（直流分）である単純化モデル上体水平位置補正用モーメント  $M_{ps}$  に関しては、不感帯特性を持たせておき、上記ローパスフィルタの出力が、ある所定値を中心とする所定範囲内に存在する状態では、

25

$M_{ps}$  が該所定値（例えば 0）に維持されるようにしておく。

分配器 221 の出力である誤差補正モーメント  $M_e$  に上体水平位置補正用モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  を  $M_p$  演算部 217b で加算することにより上体水平位置補正用摂動モデルモーメント  $M_p$  が求められる。

- 5   そして、上体水平位置補正用摂動モデルモーメント  $M_p$  は、上体水平位置補正用摂動モデル 202 に入力され、上体水平位置補正用摂動モデル 202 により補正用摂動モデル上体水平位置  $X_c$  が決定される。

- 分配器 221 のもうひとつの出力である単純化モデル上体水平位置補正用モーメント  $M_{ps}$  は単純化モデル 200 に入力される。これは、前  
10   記第 5 実施形態の図 58 において、単純化モデル上体水平位置補正用モーメント  $M_p$  を単純化モデル 200 に入力することに相当するものである。

- 単純化モデル 200 は、前記第 5 実施例と同様、単純化モデル歩容瞬時値の算出（決定）処理において、目標 ZMP まわりに床反力モーメントが発生しないように（モデル操作床反力モーメントを 0 として）歩容  
15   の瞬時値を生成した上で、単純化モデル上体姿勢角補正用モーメント  $M_{rs}$ （前回値）を発生する上体回転モードの摂動運動を付加すると共に、単純化モデル上体水平位置補正用モーメント  $M_{ps}$ （前回値）を発生する上体並進モードの摂動運動を付加して、歩容の瞬時値を補正する。

- 20   なお、本実施形態では、図 48 の S3028 の処理の一部である図 35 の S800 において、前回歩容の終端状態として、前回歩容終端における単純化モデルの状態量を用いる。従って、分配器 220, 221 から単純化モデルに出力される  $M_{rs}$  及び  $M_{ps}$  が 0 以外の値となる時があれば、単純化モデルは当初の挙動からずれるので、これに応じて S30  
25   28 において、歩容パラメータが適宜修正される。また、前記不感帯の領域を大きく設定すると、 $M_{rs}$ 、 $M_{ps}$  の絶対値が小さくなるので、歩容

パラメータの修正量の絶対値も小さくなる。

その他の構成及び処理は、第4実施例と同一である。より詳しくは、演算部204、205、Merr 演算部216、上体姿勢角補正用摂動モデル制御則207、上体水平位置補正用摂動モデル制御則206、Min  
5 演算部209、Fin 演算部210、制限処理部211、Mpf 演算部215の処理は、前記第4実施形態と同一である。

なお、本実施形態では、前記第3実施形態で説明したように今回歩容の終端等で各摂動モデル202、203の状態量により単純化モデル200の状態量を修正するような処理は行なう必要はない。これは、分配  
10 器220、221から単純化モデル上体姿勢角補正用モーメント Mrs 及び単純化モデル上体水平位置補正用モーメント Mps が追加入力されるからである。

かかる本実施形態では、前記第4実施形態あるいは第5実施形態と同様の作用効果を奏することができる。

15 なお、本実施形態では、各分配器220、221の2つの出力のうち一方を0とし、他方を入力に一致させるようにしても良い。

この場合、例えば分配器220の出力である単純化モデル上体姿勢角補正用モーメント Mrs を0にし、分配器221の出力である単純化モデル上体水平位置補正用モーメント Mps を0にすると、第4実施形態  
20 と同一の作用効果を奏することとなる（事実上、第4実施形態のものと同一構成となる）。

また、分配器220の出力である単純化モデル上体姿勢角補正用モーメント Mrs を0にし、分配器221の出力である誤差補正モーメント Me を0にしても良い。この場合、上体姿勢角補正用摂動モデルは省略  
25 できる。

また、分配器220の出力である上体姿勢角補正用摂動モデル入力

Mri を 0 にし、分配器 2 2 1 の出力である単純化モデル上体水平位置補正用モーメント  $M_{ps}$  を 0 にしても良い。

また、さらに、誤差補正モーメント  $M_e$  に上体水平位置補正用モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  を加算した値を図示しない第 3 の分配器に入力し、その出力の一方を上体水平位置補正用摂動モデルに入力し、もう一方の出力を単純化モデル上体水平位置補正用モーメント  $M_{ps}$  に加算しても良い。この場合、分配器 2 2 1 の出力である単純化モデル上体水平位置補正用モーメント  $M_{ps}$  を 0 にしても良い。すなわち、分配器 2 2 1 を省略し、フルモデル床反力モーメント誤差  $M_{err}$  にゲイン  $K_m$  を乗じた値を積分して符号を反転した値を上体水平位置補正用モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  に加算した値を第 3 の分配器に入力しても良い。

ここで、前述した第 6 実施形態と本発明との対応関係を説明しておく。第 6 実施形態は、前記第 1 ～ 1 4 発明、第 1 6 ～ 2 3 発明に対応している。この場合、第 6 実施形態では、ロボット 1 の上体姿勢角がロボットの姿勢の状態量に相当し、床反力水平成分が制限対象量に相当し、単純化モデル上体姿勢角補正用モーメント  $M_{rs}$ 、単純化モデル上体水平位置補正用モーメント  $M_{ps}$ 、上体姿勢角補正用摂動モデル入力  $M_{ri}$  および上体水平位置補正用摂動モデルモーメント  $M_p$  が目標床反力の修正操作量に相当し、補償全床反力モーメント  $M_{dmd}$  が第 1 要求操作量に相当し、コンプライアンス制御用床反力モーメントが実床反力操作量に相当し、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  および上体姿勢角補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{rfdmd}$  が第 2 要求操作量に相当する。また、動力学モデルとしての単純化モデル 2 0 0 (図 1 0 のモデル) と逆フルモデル 2 0 1 と上体姿勢補正用摂動モデル 2 0 3 と、上体水平位置補正量摂動モデル 2 0 2 とが用いられ、単純化モデル 2 0 0、上体姿勢補正用摂動モデル 2 0 3 およ

び上体水平位置補正量摂動モデル202の運動は、上体並進モードと上体回転モードを含んでいる。また、歩容パラメータは図48のS3028の処理で適宜修正される。

5 以上説明した第1～第6実施形態においては、補償全床反力モーメント  $M_{dmd}$  は、上体姿勢角・角速度の代わりに、全体重心水平位置・速度など、ロボット1の他の姿勢に関する状態量に基づいて決定しても良い。

10 前記第3～第6実施形態においては、単純化モデル200による歩容生成（単純化モデル歩容生成）には、本願出願人が先に提案した特開平5-337849号公報の第1実施例、第2実施例の歩容生成装置を用いても良い。フルモデルによる補正量を小さくすることができるので、補正された歩容が単純化モデル歩容から大きくずれることを防止できる。

15 前記第1実施形態においては、補償全床反力モーメント  $M_{dmd}$  が床反力モーメント許容範囲を越えると（第2実施形態以降においては、補償全床反力モーメント  $M_{dmd}$  とモデル操作床反力モーメントとの和が床反力モーメント許容範囲を越えると）、コンプライアンス制御用目標床反力モーメントは、床反力モーメント許容範囲の上限値あるいは下限値になる。但し、補償全床反力モーメント  $M_{dmd}$ （第2実施形態以降においては、補償全床反力モーメント  $M_{dmd}$  とモデル操作床反力モーメントとの和）が床反力モーメント許容範囲を越えていても、補償全床反力モーメント  $M_{dmd}$ （第2実施形態以降においては、補償全床反力モーメント  $M_{dmd}$  とモデル操作床反力モーメントとの和）の増加もしくは減少に応じてコンプライアンス制御用目標床反力モーメントも増加もしくは減少するようにしても良い。コンプライアンス制御用目標床反力モーメントが床反力モーメント許容範囲に接近すると、コンプライアンス制御によって制御される実床反力モーメントが目標よりも少なめに

20

25



なる傾向があり、このためコンプライアンス制御用目標床反力モーメントが少々許容範囲を越えても、すぐには、足平22の本来の接地感を低下させたり、足平22の底面が浮いてしまうような不具合が発生しない場合が多いからである。

- 5 同様に理由により、床反力モーメント許容範囲をいわゆる支持多角形で表されるZMP存在可能範囲（厳密な表現では、実床反力作用点の存在許容範囲）をモーメントに換算して得られる許容範囲を越えて設定しても良い。

- 10 コンプライアンス制御によって発生する床反力モーメントに過度に期待すると、上記のごとく足平22の本来の接地感を低下させたり、足平22の底面が浮いてしまうような不具合が発生する。よって、床反力モーメント許容範囲は、姿勢制御がコンプライアンス制御に期待する実床反力モーメントの許容範囲であると言える。

- 15 床反力モーメント許容範囲は、歩容パラメータからのみならず、検出された実床反力にも基づいて決定しても良い。また、階段でのエッジ位置検出値など、足平22の接地領域の検出値にも基づいて決定してもよい。

- 20 前記第1実施形態の図12のS028における今回歩容パラメータの修正（目標ZMPの修正）を制御周期毎に実行するように、メインフローチャートの処理を変更しても良い。

- 修正歩容（目標歩容）が元歩容より大きくずれてしまう場合（発散してしまう場合）には、次回歩容の歩容パラメータ修正をする頃に既に、大きくずれて過ぎてしまい（発散し過ぎてしまい）、次回歩容の歩容パラメータ修正だけでは、継続的長期的に安定な目標歩容を生成することが困難になる。今回歩容パラメータの修正（目標ZMPの修正）を制御  
25 周期毎に実行することによって、この問題をかなり解決することができ

る。

さらには、元歩容からのずれ具合によって、今回歩容の足平着地位置や着地時刻などを制御周期毎に変更しても良い。

具体的には、S 0 2 0 から S 0 2 9 までの処理を制御周期毎に実行する  
5 るように処理フローを変更しておき、S 0 2 0 において、次回歩容支持脚座標系（次回歩容支持脚座標系は、次の足平着地位置姿勢に対応）、次次回歩容支持脚座標系（次次回歩容支持脚座標系は、次の次の足平着地位置姿勢に対応）、今回歩容周期（今回歩容周期は、次の足平着地時刻に対応）および次回歩容周期（次回歩容周期は、定常歩容の周期に相当）の少なくともいずれかを、S 0 2 8 における今回歩容パラメータの  
10 修正（特に目標 ZMP の修正）が小さくなるように（すなわち、今回歩容の安定余裕が高く維持されるように）、適宜変更すれば良い。

さらには、上記以外の歩容パラメータを変更しても良い。

また、修正歩容の元歩容からのずれは、単純化モデル上体姿勢角補正  
15 用モーメント  $M_r$  および単純化モデル上体水平位置補正用モーメント  $M_p$  などから動力学モデルを用いて推定することができるので、 $M_r$ 、 $M_p$  に応じてモデルの挙動ずれを推定し、推定された挙動ずれを基に、歩容パラメータを修正してもよい。あるいは、 $M_r$ 、 $M_p$  と歩容パラメータの修正量の適正值との関係をあらかじめ求めてマップ化しておいて、  
20  $M_r$ 、 $M_p$  に応じてマップを基に歩容パラメータの修正量を決定してもよい。

また、他の実施形態（第 2 ～ 第 6 実施形態）に対しても上記と同様に、処理フローを変更して良い。

復元条件には、前記した条件以外にも、関節角が許容範囲を越えていないか、脚などの干渉がないか、関節角速度、トルクが過大でないかな  
25 どのキネマティクス条件、ダイナミクス条件を加えても良い。

また、これに伴って、前述したごとく、今回歩容パラメータの修正（目標ZMPあるいは着地位置、時刻などの修正）を制御周期毎に実行するようにメインフローチャートの処理を変更した場合には、今回歩容の安定余裕が高く維持されるように適宜変更される歩容パラメータの値が、適切な値になるように（ある制約条件を満足するように）することも、復元条件のひとつに加えても良い。

歩容の切り変わり目で決定された（読み込まれた）着地位置、着地時刻は、上位の制御装置からの指示（歩行計画決定部やオペレータからの指示など。これを当初の要求と呼ぶ。）によって決定されるので、修正歩容の着地位置、着地時刻は、できる限り歩容の切り変わり目で決定された（読み込まれた）着地位置、着地時刻に戻るべきである。そこで、歩容の切り変わり目で決定された（読み込まれた）着地位置、着地時刻を記憶し、修正歩容の着地位置、着地時刻が、記憶された着地位置、着地時刻にできる限り一致または近づくことも復元条件に加えても良い。

ただし、実は、前記復元条件3および復元条件4によって、修正歩容の着地位置、着地時刻は、できる限り歩容の切り変わり目で決定された（読み込まれた）着地位置、着地時刻に徐々に戻る作用が働くので、あえて追加する必要はない。

また、状況の変化に対応して、当初の要求を変更し、変更した要求を満足する歩容パラメータに、上記のごとく歩容の安定余裕を高く維持するために適宜変更される歩容パラメータが、できる限り一致または近づくことを復元条件に加えても良い。この場合、前記復元条件3および復元条件4は削除するべきである。

前述した各種の復元条件を満足するモデル上体水平位置安定化床反力モーメントとモデル上体姿勢角安定化床反力モーメントの決定法には、制約条件下で最適値を求めるための線形計画法（シンプレックス法な

ど) や探索法を用いれば良い。または、ファジー推論を用いても良い。

また、着地位置を変更する場合には、歩行環境の障害物なども考慮しなければならない状況も考えられる。このような状況にも対処できるようにするためには、環境認識や行動決定などの人工知能の分野に属する

5 処理も加えて、修正歩容を決定すべきである。

前記第3～第6実施形態における制限手段(制限処理部211)の前後のブロック図は、例えば本願出願人が2002年12月26日付けで出願したPCT出願(名称:制御システム)で示したように、等価変換あるいは近似変換しても良い。

10 この場合、上体水平位置補正用モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  を  $h$  で割った値をローパスフィルタに通した値を補正目標床反力水平成分(フルモデル床反力水平成分  $F_{full}$ ) から減じた値が上記PCT出願におけるバイアス推定値  $destm$  に相当する。したがって、例えば、前記第4～第6実施形態におけるゲイン  $K_c$  の積分を、時定数  $1/K_c$  の1次遅れ  
15 をフィードバック要素としたポジティブフィードバック系に置き換えたりして、図60のように、近似変換をしても良い。この例では、第4～第6実施形態における  $M_{pf}$  演算部215が図示の如く近似変換されている。

前記第1実施形態においては、本願出願人が提案した特開平5-33  
20 7849号公報に記載の構成に加え、床反力の並進力水平成分が床反力水平成分の許容範囲を越えないように、床反力水平成分と目標ZMPまわりの床反力モーメントとの発生の割合が異なる2つの運動モードの挙動、例えば、上体並進運動モードの上体並進加速度と上体回転運動モードの上体姿勢角加速度が決定されるので、実ロボット1を、修正目標歩  
25 容(最終的に歩容生成装置100が出力する歩容)に収束させることができる。つまり、実ロボット1の姿勢を安定化させることができる。

また、コンプライアンス制御用目標床反力モーメントとモデル操作床反力モーメントの差がトータルの復元力になる。

また、モデル操作床反力モーメントは、ZMP存在可能範囲を無視していかなる値でも取ることが可能であるので、非常に高い姿勢復元力を  
5 発生することができる。

また、床反力の並進力水平成分が、床反力水平成分の許容範囲を越えないので、ロボット1のスリップを防止できる。

また、床反力鉛直成分が0の時期、すなわち、両脚体2, 2がいずれも接地していない時期では、上体並進運動モードに依存せずに上体回転  
10 運動モードに依存した姿勢復元が行われ、床と足平22の間の摩擦力に依存せずに効果的に姿勢復元が行われる。

また、実床反力モーメントが過大になることを防止するので、足平22の本来の接地性が低下したり、足平22の底面が浮いてしまうような不具合が発生することを防止または抑制することができる。

15 また、1歩分の修正歩容の終端状態を新たな初期状態とした新たな今回歩容が、定常歩容に漸近するように、今回歩容パラメータが決定または変更されるので、継続的に（長期的に）安定性が保証された歩容を生成し続けることができる。

前記第2実施形態においては、上記のごとく、元歩容と修正歩容が同  
20 時に生成され、修正歩容は、実ロボット1の姿勢安定化のために修正されると共に、コンプライアンス制御により姿勢復元に必要な床反力モーメントを発生してもまだ余裕がある場合には、この余裕を用いて、可能な範囲で元歩容に収束するようにしている。このため、第1実施形態の効果に加え、当初設定した元歩容に近い、すなわち、当初の要求通りの  
25 歩容に近い歩容を生成することができる。したがって、あらかじめ設定された移動経路がある場合には、移動経路から大きくずれることを防止

できる。また、修正歩容の上体姿勢角が元歩容（当初決定した歩容）の上体姿勢角に収束することを、修正歩容の上体水平位置が元歩容（当初決定した歩容）の上体水平位置に収束することよりも優先したので、上体姿勢角が大きく変動することを抑制することができる。

- 5 前記第1～第6実施形態では、床反力水平成分許容範囲を設定するようにしたが、床反力水平成分とロボット全体重心水平加速度は、比例関係にあるので、前記各実施形態における床反力水平成分およびその許容範囲の代わりに、ロボット全体重心水平加速度およびその許容範囲を用いても構わない。また、ロボット全体重心水平軌道に近い挙動をする部位
- 10 位の水平加速度軌道に関するパラメータを明示的に設定しても構わない。例えば、脚体2，2の質量が上体24の質量に比べ十分に小さい場合には、上体水平加速度軌道とロボット1の全体重心水平加速度軌道は、ほぼ同じか比例関係にあるので、床反力水平成分およびその許容範囲の代わりに上体水平加速度およびその許容範囲を用いても良い。
- 15 さらに、斜面移動時（傾斜した床面でロボット1を移動させるとき）の歩容生成においては、床反力水平成分許容範囲や全体重心加速度水平成分の許容範囲の代わりに、並進床反力の床面平行成分（床面に平行な成分）、すなわち摩擦力の許容範囲、あるいは全体重心加速度の床面平行成分（これは重力成分を除けば摩擦力に比例する）の許容範囲を設定
- 20 するようにしてもよい。例えば、並進床反力の床面平行成分（摩擦力）の許容範囲を設定する場合に関して説明（この説明は全体重心加速度の床面平行成分の許容範囲を設定する場合でも同様である）すると、該摩擦力は、床面の水平面に対する傾斜角度を $\theta_f$ （ロボット1の進行方向に向かって前下がり斜面の場合を正とする）とすると、次式c72の関係
- 25 係が成立する。従って、前記実施形態と同様のアルゴリズムに歩容を生成する場合、この式c72の関係を用いて、摩擦力許容範囲を床反力水

平成分許容範囲に変換することで、該床反力水平成分許容範囲を設定するようにすればよい。なお、この場合、式 c 7 2 の床反力鉛直成分には、目標床反力鉛直成分を用いればよい。

5 摩擦力 = 床反力水平成分 \*  $\cos(\theta f)$  - 床反力鉛直成分 \*  $\sin(\theta f)$

…式 c 7 2

床反力水平成分と目標 Z M P まわりの床反力モーメントとを適切な値にするために、前記の実施形態では、上体回転モードと上体並進モードとの2つの運動モードを用いたが、これら以外の運動モードを用いても良い。この場合、運動モードのひとつが床反力水平成分を発生しない運動モードである必要もない。いかなるモードの組み合わせであっても、床反力水平成分と目標 Z M P まわりの床反力モーメントの発生の割合が異なる2つの運動モードを用いさえすれば、上記例のように、任意の床反力水平成分と目標 Z M P まわりの床反力モーメントとを発生させることができるからである。

また、上体姿勢以外の運動モードを用いても良い。ただし、なるべく小さい変位で大きな床反力水平成分または目標 Z M P まわりの床反力モーメントが発生できる運動モードを選ぶべきである。

例えば、左右の腕を同一回転方向に振りまわす運動モード、接地していない（空中に存在する）足平の位置を振動させる運動モードでも良い。ただし、遊脚軌道を振動させる場合には、着地位置が変わらないように着地直前までには、振動量を実質的に0に戻すべきである。

また、3つ以上の運動モードを用いても良い。

また、選んだモードのうちの少なくとも2つは、床反力水平成分と目標 Z M P まわりの床反力モーメントとの発生比率が、互いに異なるもの

である必要がある。そうでないと、一般的に連立方程式の解がなくなるからである。

さらにできる限り、床反力水平成分をあまり変化させないで目標 Z M P まわりの床反力モーメントを十分に大きく変化させることができる運動モードと、目標 Z M P まわりの床反力モーメントをあまり変化させないで床反力水平成分を十分に大きく変化させることができる運動モードとを組み合わせることが望ましい。

言いかえると、全体重心をあまり変化させないで角運動量を十分に大きく変化させることができる運動モードと、角運動量をあまり変化させないで全体重心を十分に大きく変化させることができる運動モードとを組み合わせることが望ましい。運動モードの変位が小さくなるからである。

前記単純化モデルとして、前記実施形態に用いた動力学モデル以外にも以下のモデルを用いても良い。

- 15 1) 図 12 に示したように複数のリンクに質点を設定した非線形なモデル (多質点モデル)
- 2) 本願出願人による特願 2000-352011 号に示された 3 質点モデル
- 3) 上体にのみ質量がある 1 質点モデル
- 20 4) 全体重心まわりの角運動量変化によって生じる慣性力のモーメントを無視したモデル
- 5) 重力と慣性力との合力 (または床反力) と上体並進運動との関係を表す部分モデルと、上記合力と上体回転運動の関係を表す部分モデルを分離して持つ分離型モデル。例えば、図 10 に示す質点は、上記合力と
- 25 上体並進運動との関係を表す部分モデルであり、図 10 に示すフライホイールは、上記合力と上体回転運動との関係を表す部分モデルである。



ただし、単純化モデルに単純化モデル上体姿勢角補正用モーメントが加えられる実施形態においては、上記2)、3)、および4)のモデルを用いることはできない。

- 5 尚、フルモデルは、基本的には、単純化モデルよりもより近似精度の高い動力学モデルを用いることが好ましいが、単純化モデルと同等の近似精度の動力学モデルを用いてもよい。

また、前述した各実施形態において、ブロック線図、フローチャート、およびアルゴリズムなどは、演算処理順序を変えるなどの等価変形をしても良い。また、適宜ローパスフィルタを挿入しても良い。

- 10 また、前記各実施形態を2足移動ロボットに関して説明してきたが、1足もしくは3足以上の多脚ロボットにも本発明を適応することができる。

#### 産業上の利用可能性

- 15 以上のように本発明は2足移動ロボット等の脚式移動ロボットを、スリップ等を生じることなく安定した姿勢で円滑に移動させることが可能なロボットの動作制御を行なうことができるものとして有用である。

## 請 求 の 範 囲

1. 上体から延設された脚体を運動させて移動する脚式移動ロボットの目標運動の瞬時値を、少なくとも該ロボットの運動と床反力との関係を表す動力学モデルを用いて逐次決定しつつ、その決定した目標運動の瞬時値に追従させるように前記ロボットの動作制御を行なう脚式移動ロボットの制御装置において、

少なくとも前記ロボットに作用する並進床反力水平成分又は並進床反力の床面平行成分又は該ロボットの全体重心加速度又は全体重心加速度の床面平行成分を制限対象量とし、該制限対象量の許容範囲を設定する許容範囲設定手段と、

少なくとも前記決定された目標運動の瞬時値に対応するロボットの姿勢の目標状態量と該ロボットの姿勢の実状態量との偏差に基づいて、前記目標運動の新たな瞬時値を、該新たな瞬時値に対応して前記動力学モデルに基づき定まる前記制限対象量が前記許容範囲内に収まるように決定する目標瞬時値決定手段とを備えたことを特徴とする脚式移動ロボットの制御装置。

2. 前記動力学モデルの運動は、少なくとも床反力モーメントと並進床反力との発生比率が互いに異なる前記ロボットの複数の運動モードを含み、前記目標瞬時値決定手段は、前記動力学モデルの運動の複数の運動モードを少なくとも前記許容範囲に応じて調整して前記目標運動の新たな瞬時値を決定することを特徴とする請求の範囲第1項に記載の脚式移動ロボットの制御装置。

3. 前記運動モードは、前記ロボットの重心を略一定に維持しつつ該ロボットの所定の部位の姿勢を変化させる姿勢変化運動と、該ロボットの上部の並進運動とを含むことを特徴とする請求の範囲第2項に記載の脚式移動ロボットの制御装置。

4. 少なくとも前記動力学モデルの状態量に応じて前記ロボットの目標床反力及び／又は目標運動の現在以降のパターンを決定するための歩容パラメータを修正する手段を備えたことを特徴とする請求の範囲第1項に記載の脚式移動ロボットの制御装置。

5. 前記ロボットの目標床反力の基準瞬時値を逐次決定する手段が備えられ、前記目標瞬時値決定手段は、少なくとも前記偏差と前記制限対象量の許容範囲とに応じて前記目標床反力の修正操作量を決定すると共に、該修正操作量により前記基準瞬時値を修正してなる床反力に、前記目標運動の新たな瞬時値により前記動力学モデル上で発生する慣性力と重力との合力を釣り合わせるように前記目標運動の新たな瞬時値を決定することを特徴とする請求の範囲第1項に記載の脚式移動ロボットの制御装置。

6. 前記動力学モデルの運動は、少なくとも床反力モーメントと並進床反力との発生比率が互いに異なる前記ロボットの複数の運動モードを含み、前記目標瞬時値決定手段は、前記動力学モデルの運動の複数の運動モードを少なくとも前記許容範囲に応じて調整して前記目標運動の新たな瞬時値を決定することを特徴とする請求の範囲第5項に記載の脚式移動ロボットの制御装置。

7. 前記運動モードは、前記ロボットの重心を略一定に維持しつつ該ロボットの所定の部位の姿勢を変化させる姿勢変化運動と、該ロボットの上体の並進運動とを含むことを特徴とする請求の範囲第6項に記載の脚式移動ロボットの制御装置。

8. 前記目標瞬時値決定手段は、前記目標床反力の修正操作量により前記基準瞬時値を修正してなる床反力に前記合力を釣り合わせるために、前記姿勢変化運動および前記上体の並進運動のうち、該上体の並進運動を優先的に調整して前記目標運動の新たな目標瞬時値を決定することを

特徴とする請求の範囲第7項に記載の脚式移動ロボットの制御装置。

9. 前記目標床反力の修正操作量を少なくとも前記偏差と前記制限対象量の許容範囲と前記動力学モデルの状態量とに応じて決定する手段を備えたことを特徴とする請求の範囲第5項に記載の脚式移動ロボットの制御装置。

10. 前記目標運動の瞬時値を決定するために用いる前記目標床反力の修正操作量及び／又は該修正操作量による前記動力学モデルの状態量の変化に応じて前記ロボットの目標床反力及び／又は目標運動の現在以降のパターンを決定するための歩容パラメータを修正する手段を備えたことを特徴とする請求の範囲第5項に記載の脚式移動ロボットの制御装置。

11. 前記偏差に応じて該偏差が0に近づくように床反力の第1要求操作量を決定する第1手段と、少なくとも該第1要求操作量に基づき前記ロボットの実床反力の目標値を規定する実床反力操作量と前記目標床反力の修正操作量とを決定する第2手段と、前記実床反力操作量と前記目標運動の瞬時値とに応じて前記ロボットの動作制御を行なう第3手段とを備えたことを特徴とする請求の範囲第5項に記載の脚式移動ロボットの制御装置。

12. 前記第1要求操作量、前記実床反力操作量、および前記目標床反力の修正操作量は、いずれも床反力作用点回りの床反力モーメント又は該床反力作用点の位置又はZMPに関する操作量であることを特徴とする請求の範囲第11項に記載の脚式移動ロボットの制御装置。

13. 前記第2手段は、前記実床反力操作量と前記目標床反力の修正操作量との差が前記第1要求操作量の増加に伴い単調に変化するように前記実床反力操作量と前記目標床反力の修正操作量とを決定することを特徴とする請求の範囲第11項または第12項に記載の脚式移動ロボットの制御装置。

14. 前記第2手段は、前記実床反力操作量を前記基準瞬時値に加えたものが所定の実床反力許容範囲内に収まるように該実床反力操作量を決定することを特徴とする請求の範囲第11項に記載の脚式移動ロボットの制御装置。

- 5 15. 前記第2手段は、前記第1要求操作量を前記基準瞬時値に加えたものが前記所定の実床反力許容範囲内の値であるときには、該第1要求操作量を前記実床反力操作量として決定すると共に、前記目標床反力の修正操作量を略0又は前記動力学モデルの状態量に応じて定めた値に決定し、前記第1要求操作量を前記基準瞬時値に加えたものが前記所定の実床反力許容範囲を逸脱する値であるときには、該実床反力許容範囲の限界値から前記基準瞬時値を差し引いたものを前記実床反力操作量として決定すると共に、少なくとも前記実床反力操作量と前記第1要求操作量との差分に応じて前記目標床反力の修正操作量を決定することを特徴とする請求の範囲第14項に記載の脚式移動ロボットの制御装置。
- 10 16. 前記第2手段は、前記実床反力操作量と前記目標床反力の修正操作量との差が少なくとも前記第1要求操作量に応じた値になるように該実床反力操作量および目標床反力の修正操作量の仮決定値を求める手段と、その求めた目標床反力の修正操作量の仮決定値を用いて前記目標運動の新たな瞬時値を決定したと仮定した場合における当該目標運動の新たな瞬時値に対応する前記制限対象量の推定値を求める手段と、前記求めた実床反力操作量の仮決定値を前記基準瞬時値に加えたものと前記制限対象量の推定値とを前記所定の実床反力許容範囲及び前記制限対象量の許容範囲と比較し、その比較結果に基づき該実床反力許容範囲及び該制限対象量の許容範囲の制限を満たす実床反力操作量および制限対象量の組を決定する手段と、その決定した実床反力操作量から前記第1要求操作量を差し引いたものと制限対象量とに基づき前記目標床反力の修正
- 15
- 20
- 25

操作量を決定する手段とから構成されていることを特徴とする請求の範囲第14項に記載の脚式移動ロボットの制御装置。

17. 前記動力学モデルの運動は、少なくとも床反力モーメントと並進床反力との発生比率が互いに異なる複数の運動モードを含んでおり、前記目標床反力の修正操作量は、各運動モードにそれぞれ対応する複数の操作量から構成されていることを特徴とする請求の範囲第16項に記載の脚式移動ロボットの制御装置。

18. 前記動力学モデルの状態量に応じて該状態量を所定の状態量に近づけるように床反力の第2要求操作量を決定する第4手段を備え、前記第2手段は、少なくとも前記第1要求操作量と前記第2要求操作量と前記許容範囲とに基づき前記実床反力操作量と前記目標床反力の修正操作量とを決定することを特徴とする請求の範囲第11項に記載の脚式移動ロボットの制御装置。

19. 前記第1および第2要求操作量、前記実床反力操作量並びに前記目標床反力の修正操作量は、いずれも床反力作用点回りの床反力モーメント又は該床反力作用点の位置又はZMPに関する操作量であることを特徴とする請求の範囲第18項に記載の脚式移動ロボットの制御装置。

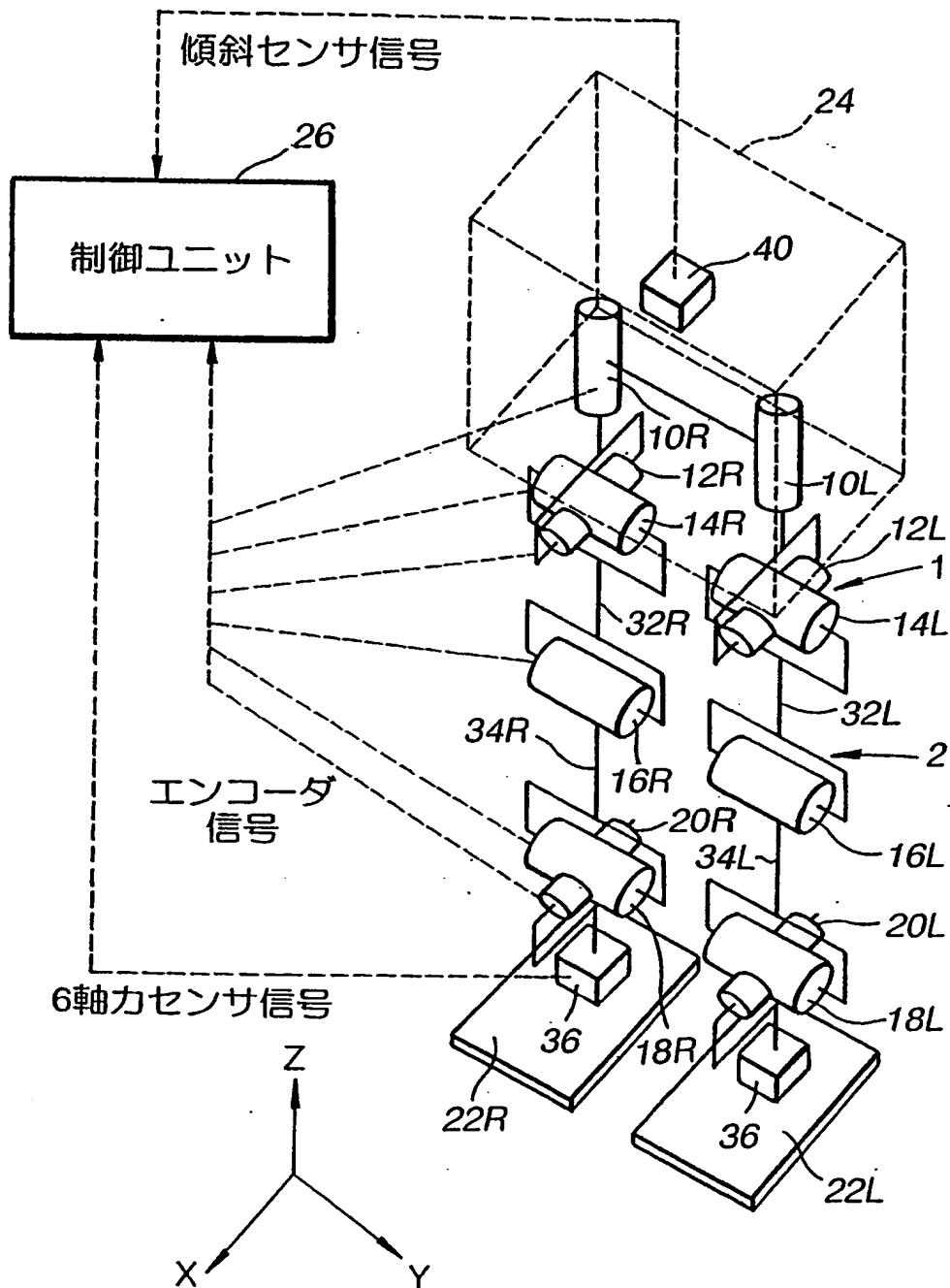
20. 前記第2手段は、前記実床反力操作量と前記目標床反力の修正操作量との差が、前記第1要求操作量の増加に伴い単調に変化するように前記実床反力操作量および前記目標床反力の修正操作量を決定することを特徴とする請求の範囲第18項又は第19項に記載の脚式移動ロボットの制御装置。

21. 前記第2手段は、前記実床反力操作量を前記基準瞬時値に加えたものが所定の実床反力許容範囲内に収まるように該実床反力操作量を決定することを特徴とする請求の範囲第18項に記載の脚式移動ロボットの制御装置。

22. 前記第2手段は、前記実床反力操作量と前記目標床反力の修正操作量との差が少なくとも前記第1要求操作量に応じた値になり、且つ前記目標床反力の修正操作量が前記第2要求操作量に応じた値になるように該実床反力操作量および目標床反力の修正操作量の仮決定値を求める
- 5 手段と、その求めた目標床反力の修正操作量の仮決定値を用いて前記目標運動の新たな瞬時値を決定したと仮定した場合における当該目標運動の新たな瞬時値に対応する前記制限対象量の推定値を求める手段と、前記求めた実床反力操作量の仮決定値を前記基準瞬時値に加えたものと前記制限対象量の推定値とを前記所定の実床反力許容範囲及び前記制限対象量の許容範囲と比較し、その比較結果に基づき該実床反力許容範囲及び該制限対象量の許容範囲の制限を満たす実床反力操作量および制限対象量の組を決定する手段と、その決定した実床反力操作量から前記第1
- 10 要求操作量を差し引いたものと制限対象量とに基づき前記目標床反力の修正操作量を決定する手段とから構成されていることを特徴とする請求
- 15 の範囲第21項に記載の脚式移動ロボットの制御装置。
23. 前記動力学モデルの運動は、少なくとも床反力モーメントと並進床反力との発生比率が互いに異なる複数の運動モードを含んでおり、前記目標床反力の修正操作量は、各運動モードにそれぞれ対応する複数の操作量から構成されていることを特徴とする請求の範囲第22項に記載
- 20 の脚式移動ロボットの制御装置。

1/51

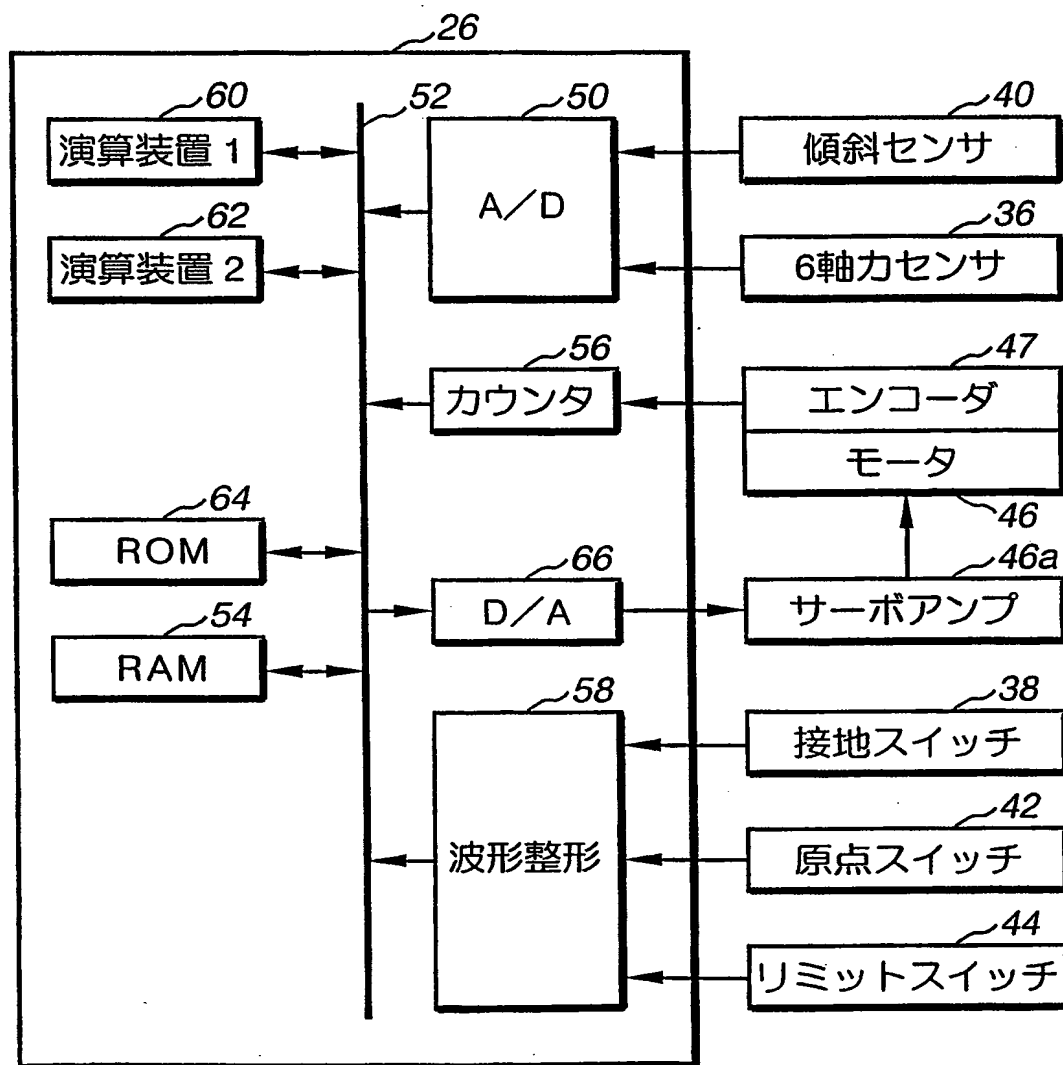
FIG. 1





2/51

FIG. 2



**FIG. 3**

# 複合コンプライアンス制御装置

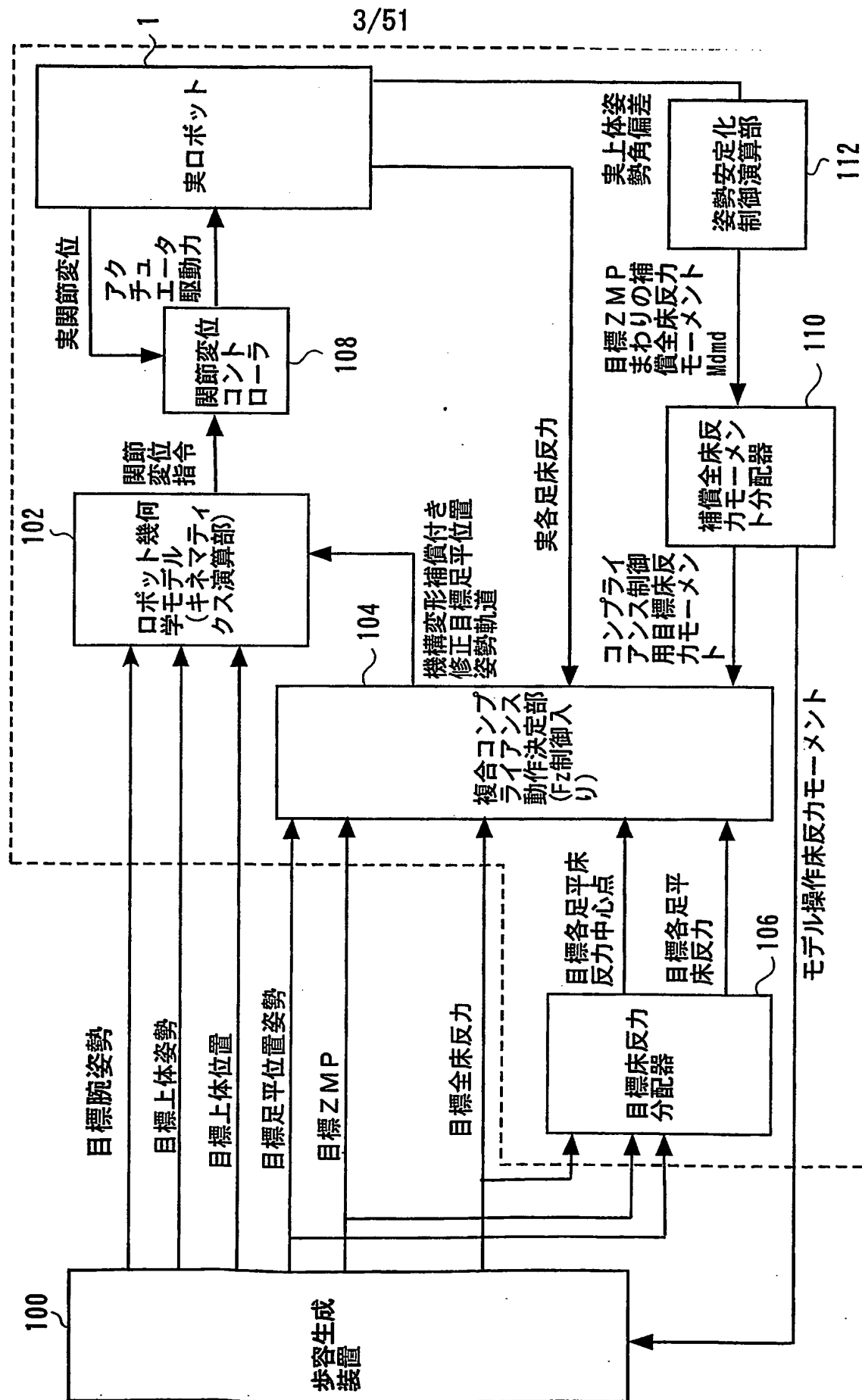


FIG. 4

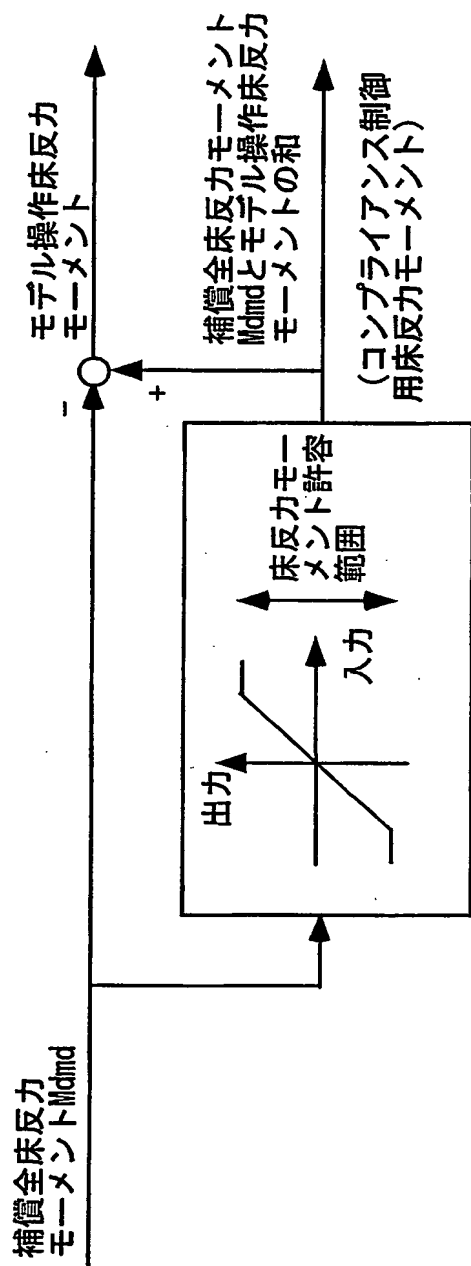
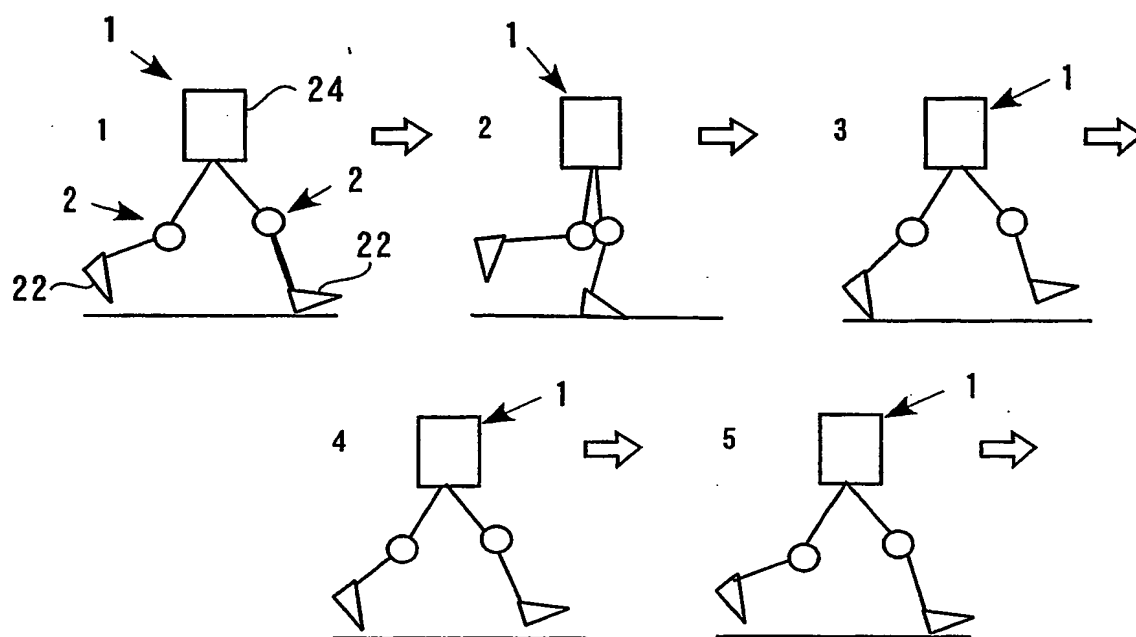


FIG. 5  
(走行歩容)



6/51

FIG. 6

(目標床反力鉛直成分)

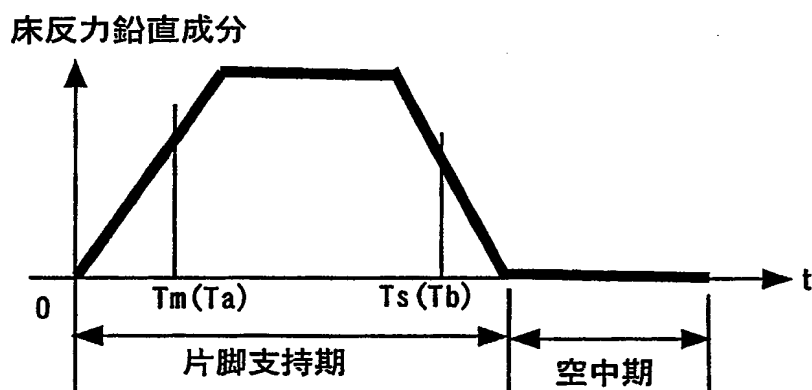
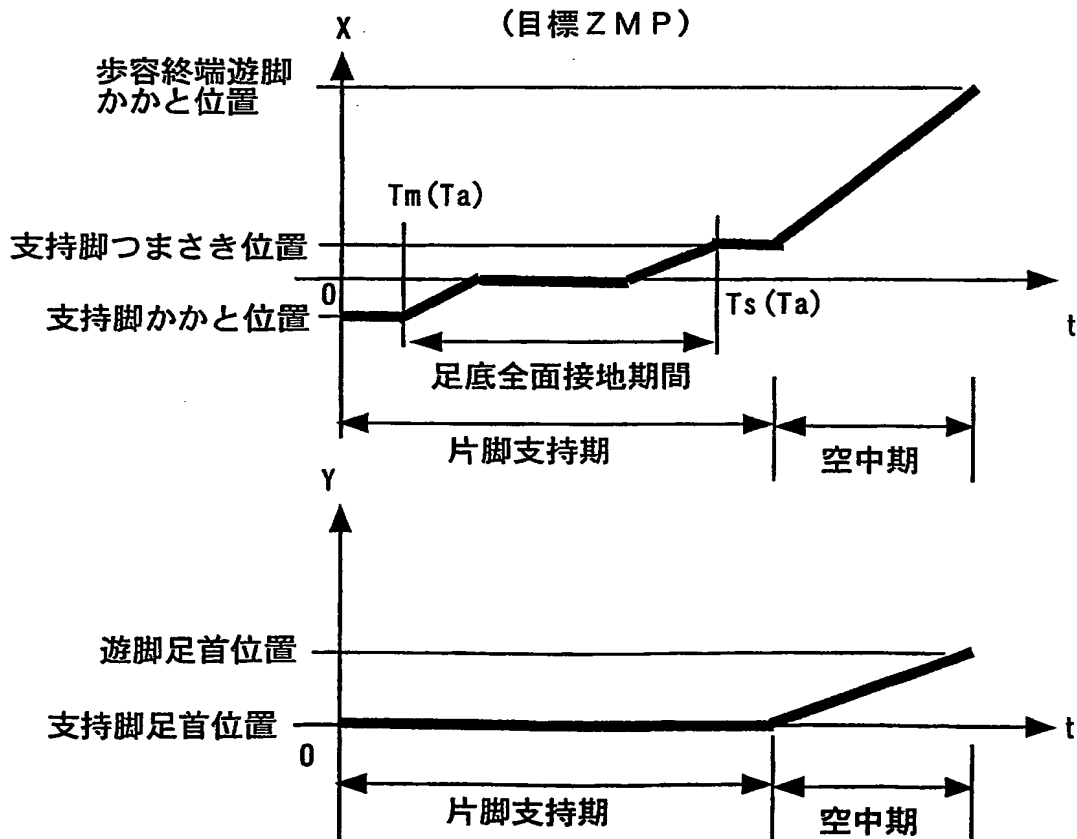


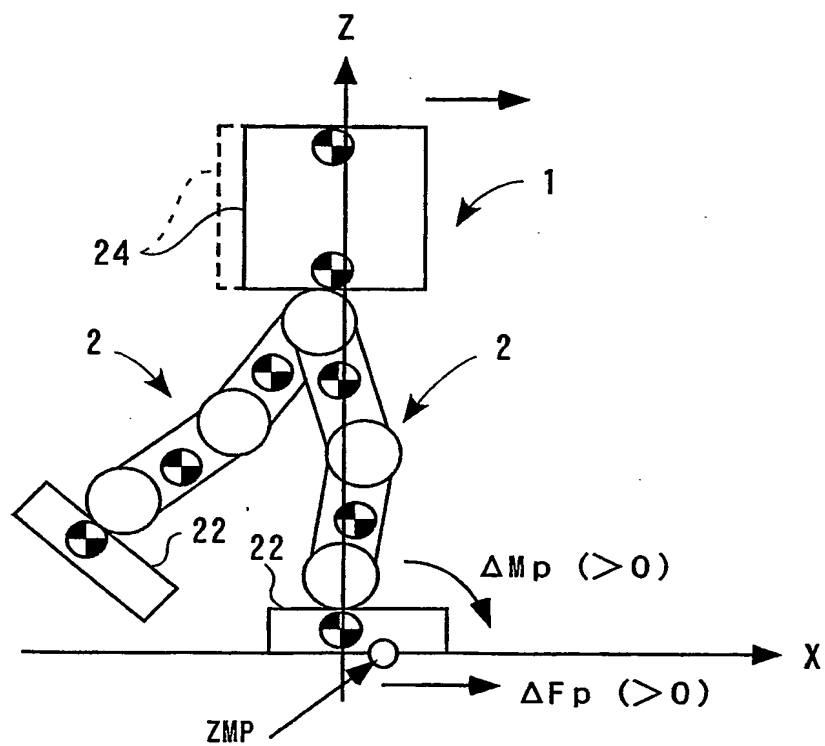
FIG. 7

(目標ZMP)



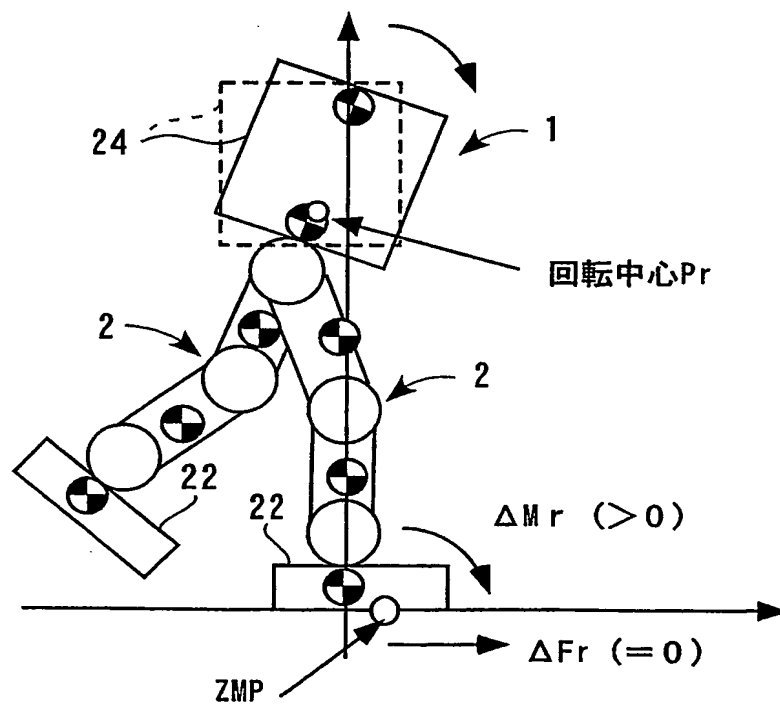
7/51

FIG. 8  
(上体並進モード)



8/51

FIG. 9  
(上体回転モード)



9/51

FIG. 10

(フライホイール付単純化モデル)

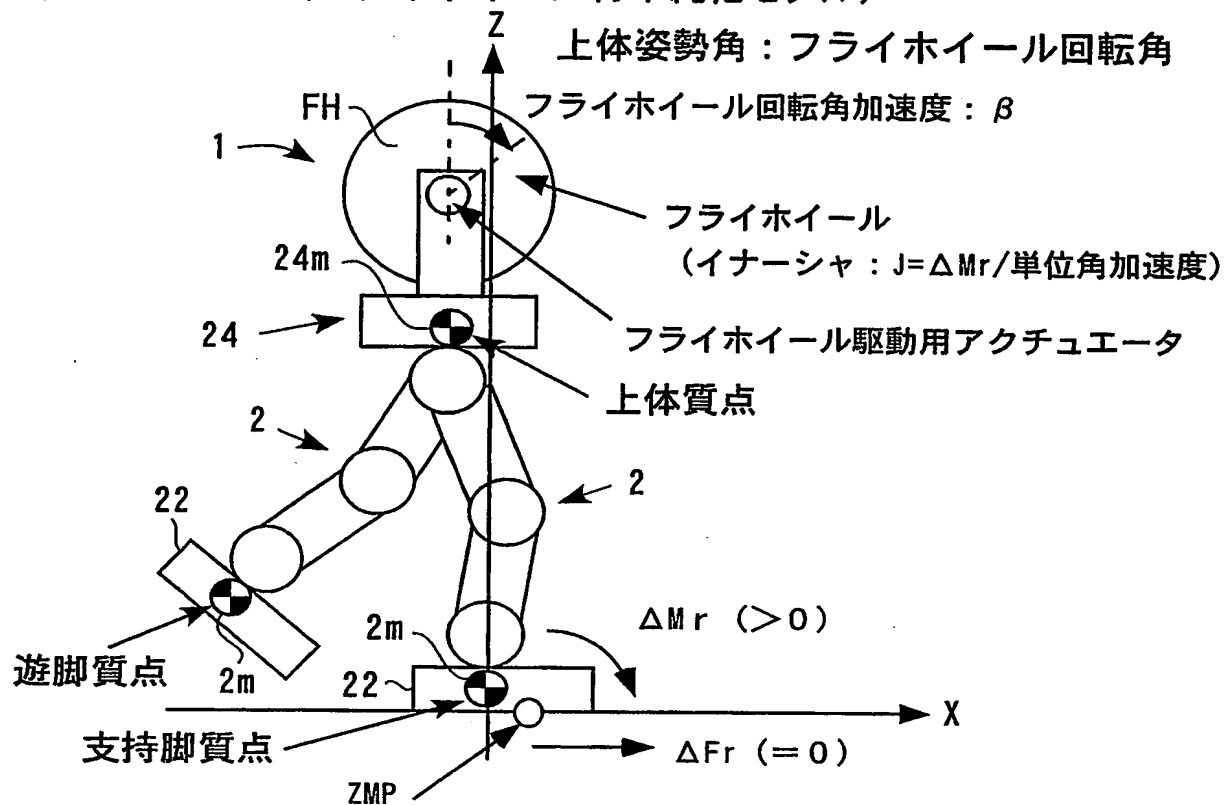
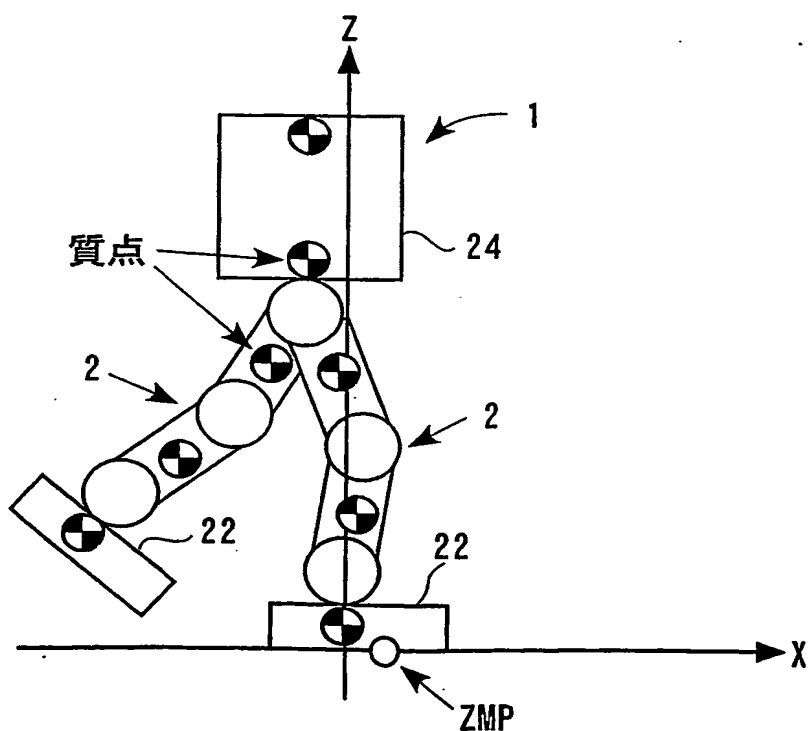


FIG. 11

(フルモデル)

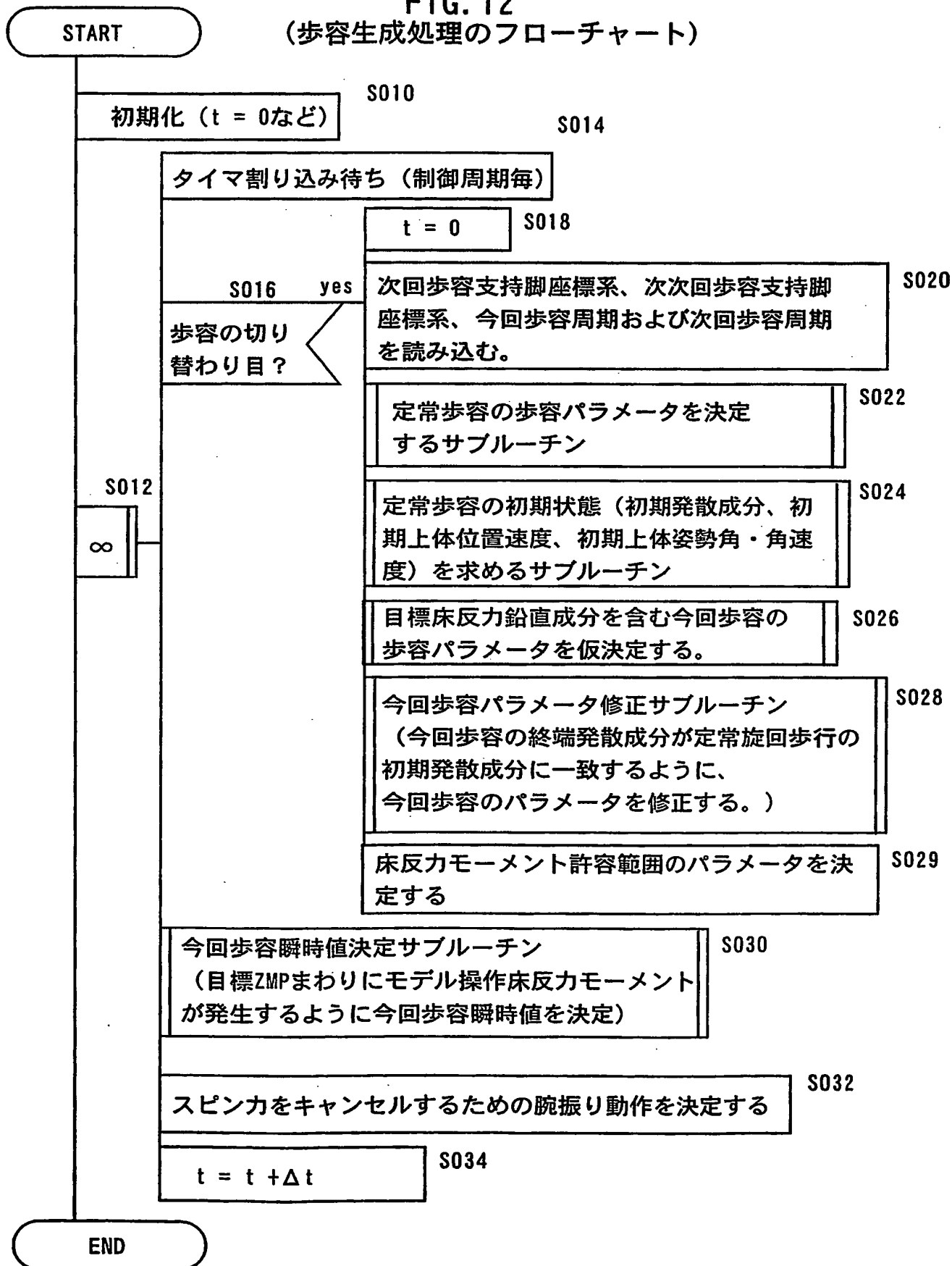




10/51

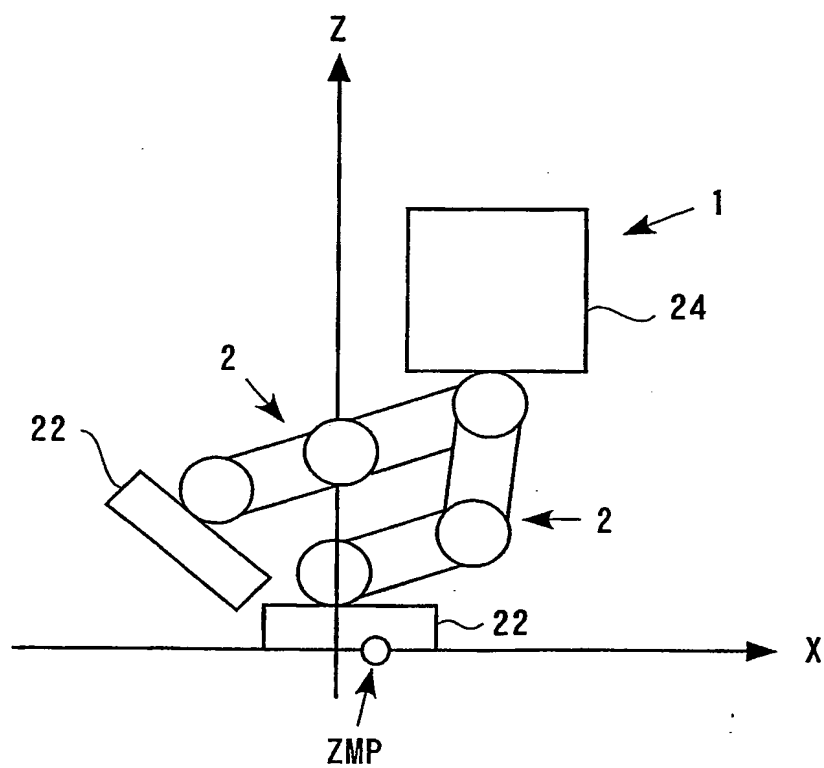
FIG. 12

(歩容生成処理のフローチャート)



11/51

FIG. 13  
(上体位置発散状態)



12/51

FIG. 14  
(定常歩容パラメータの決定処理)

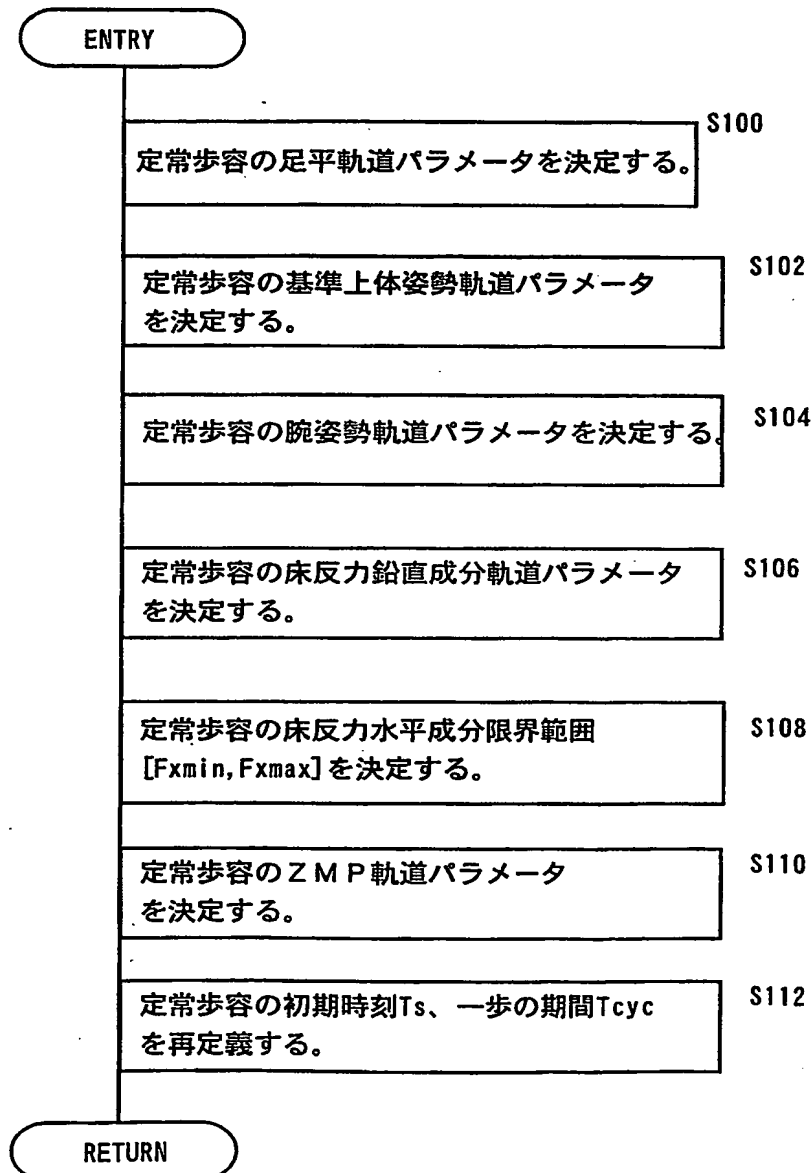
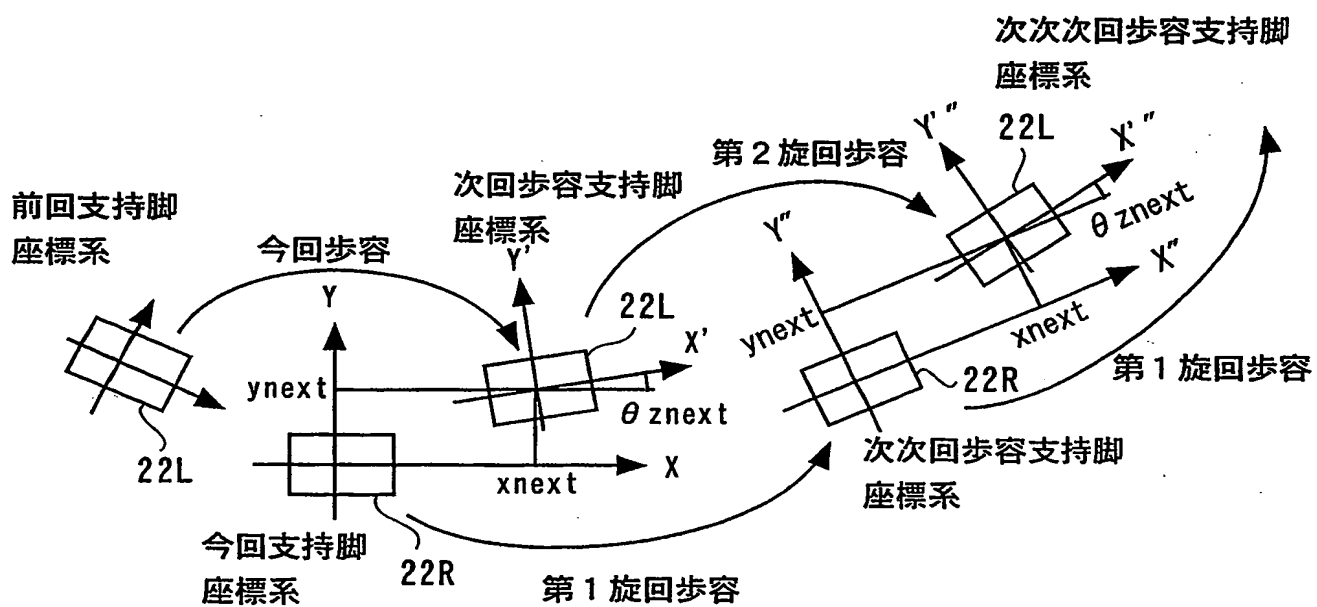


FIG. 15

(定常歩容の足平着地位置姿勢の関係)



14/51

FIG. 16

(目標床反力鉛直成分)

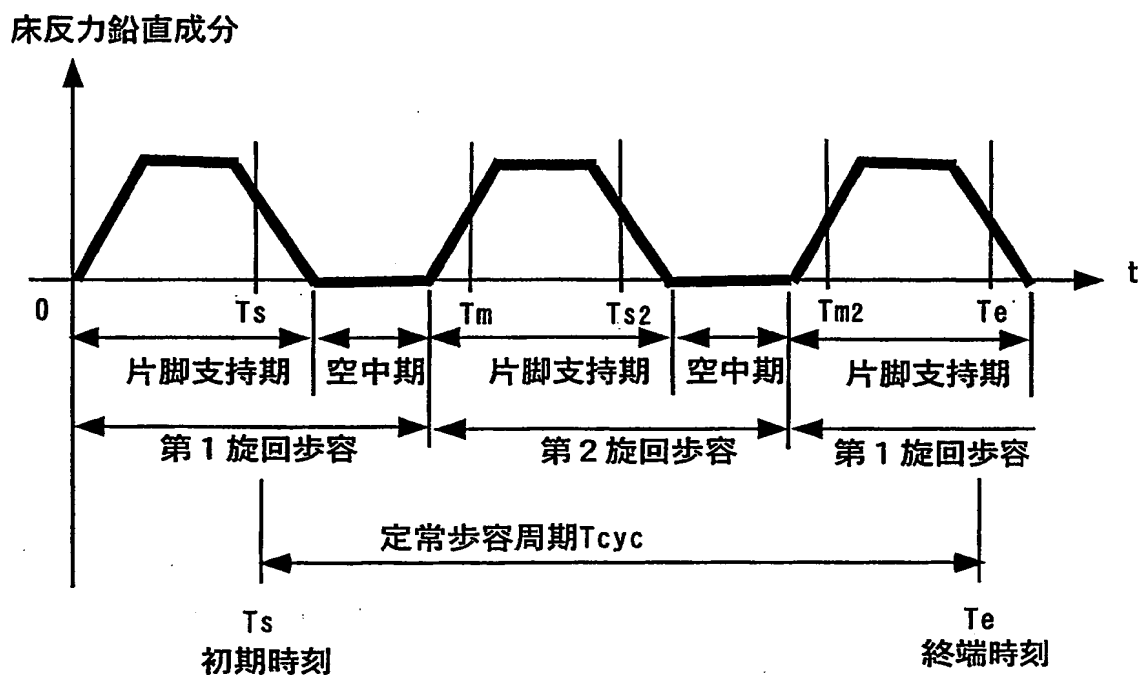
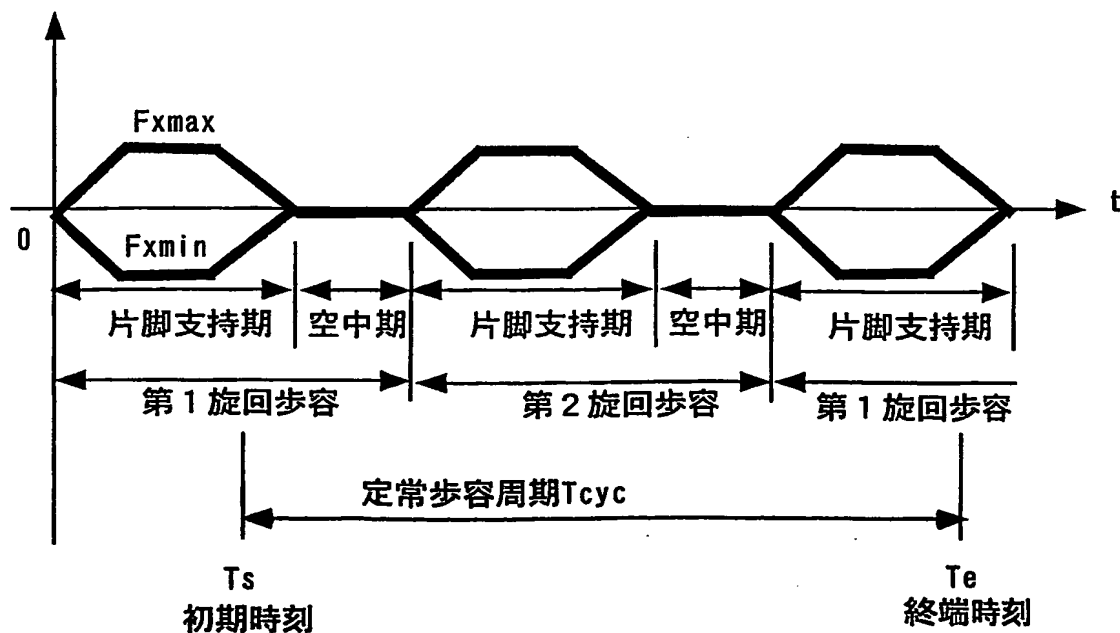


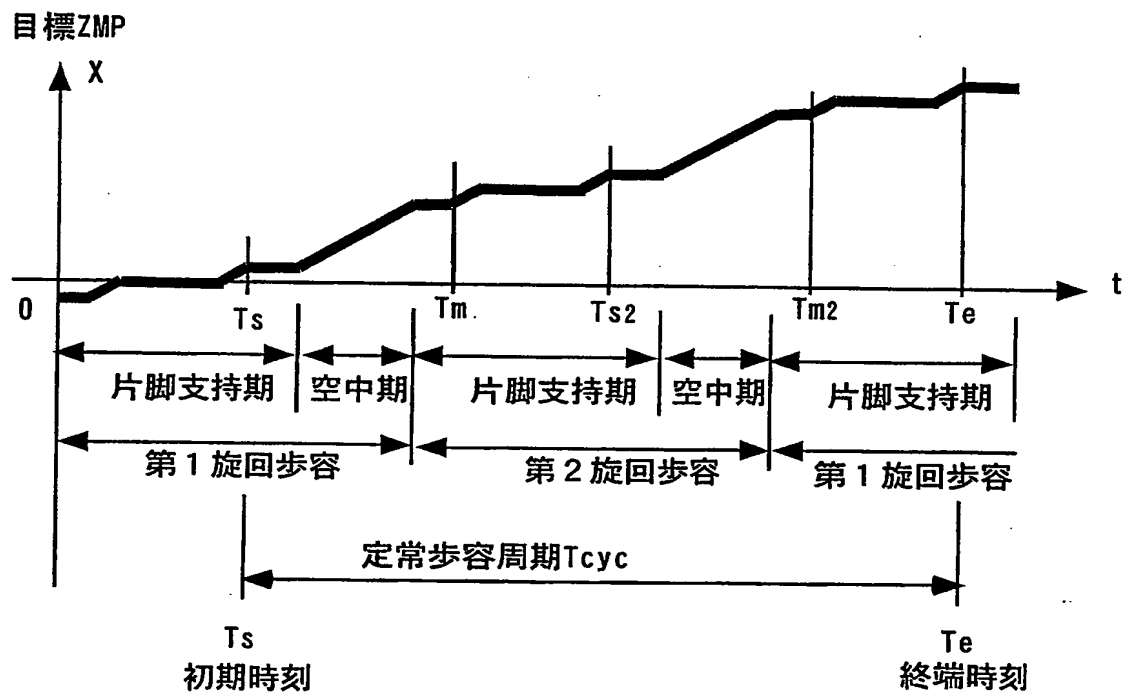
FIG. 17

(床反力水平成分許容範囲)

床反力水平成分許容下限値 $F_{xmin}$ と床反力水平成分許容上限値 $F_{xmax}$ 

15/51

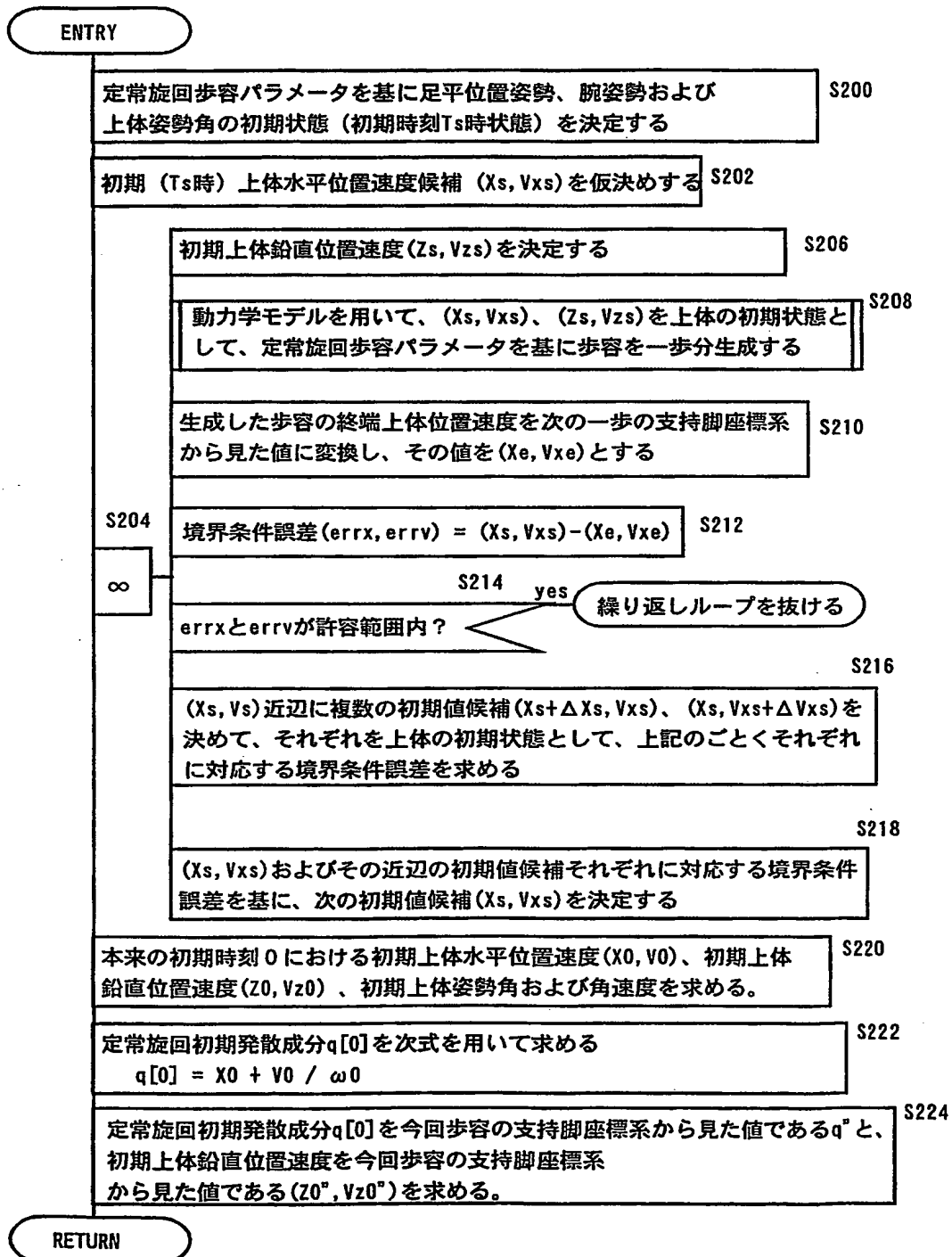
FIG. 18  
(目標ZMP)



16/51

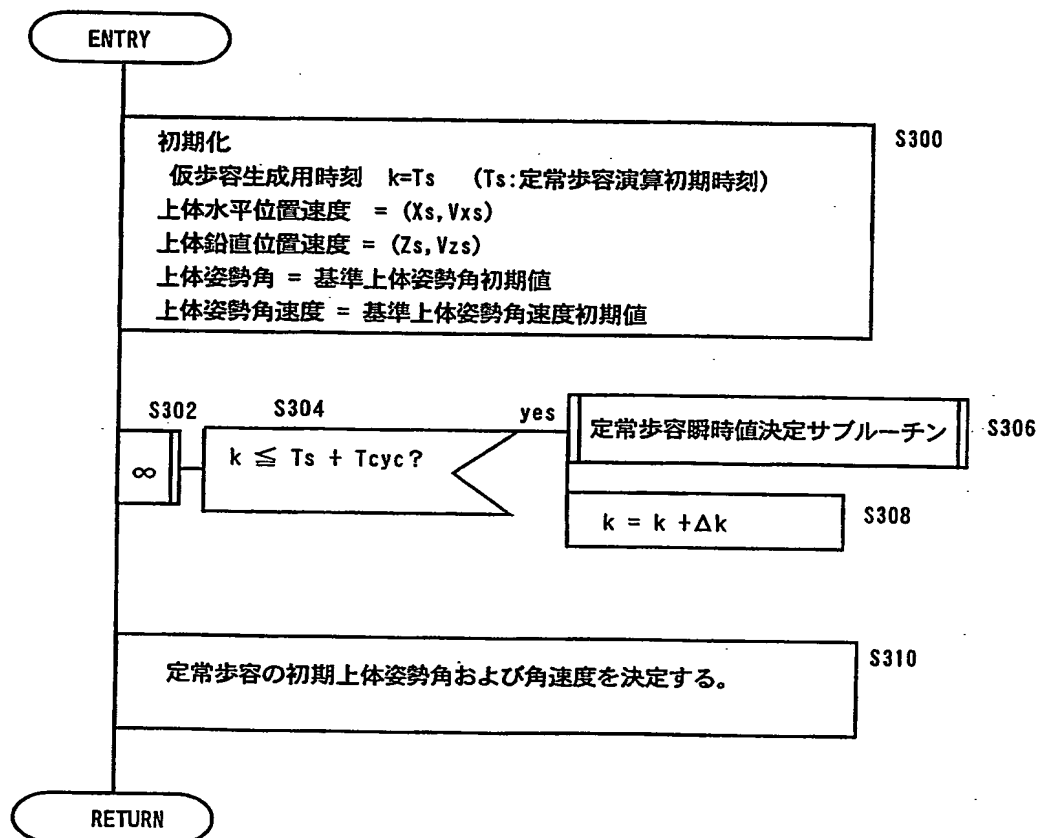
FIG. 19

(定常歩容の初期発散成分の探索処理)



17/51

FIG. 20  
(定常歩容の仮歩容生成処理)

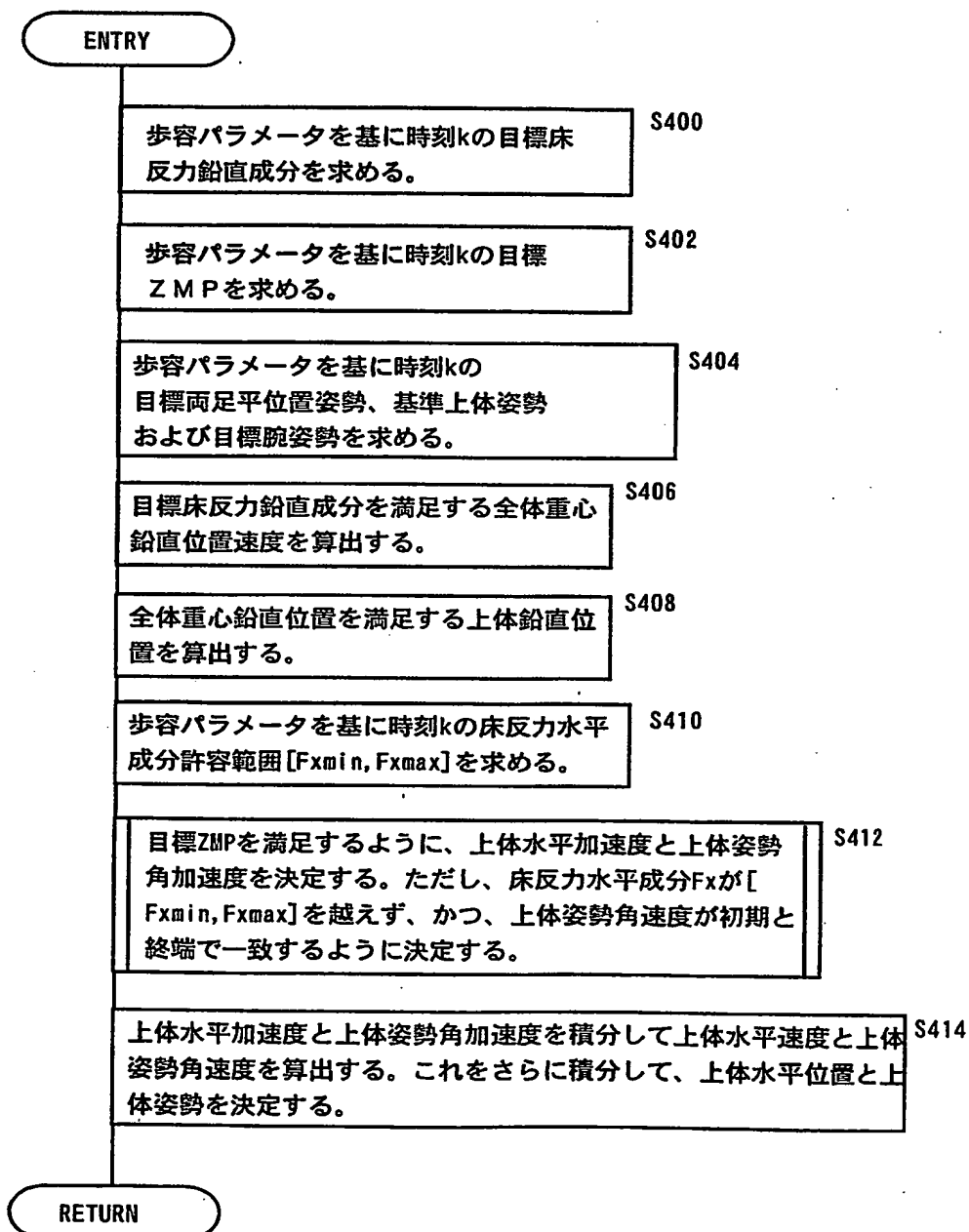




18/51

FIG. 21

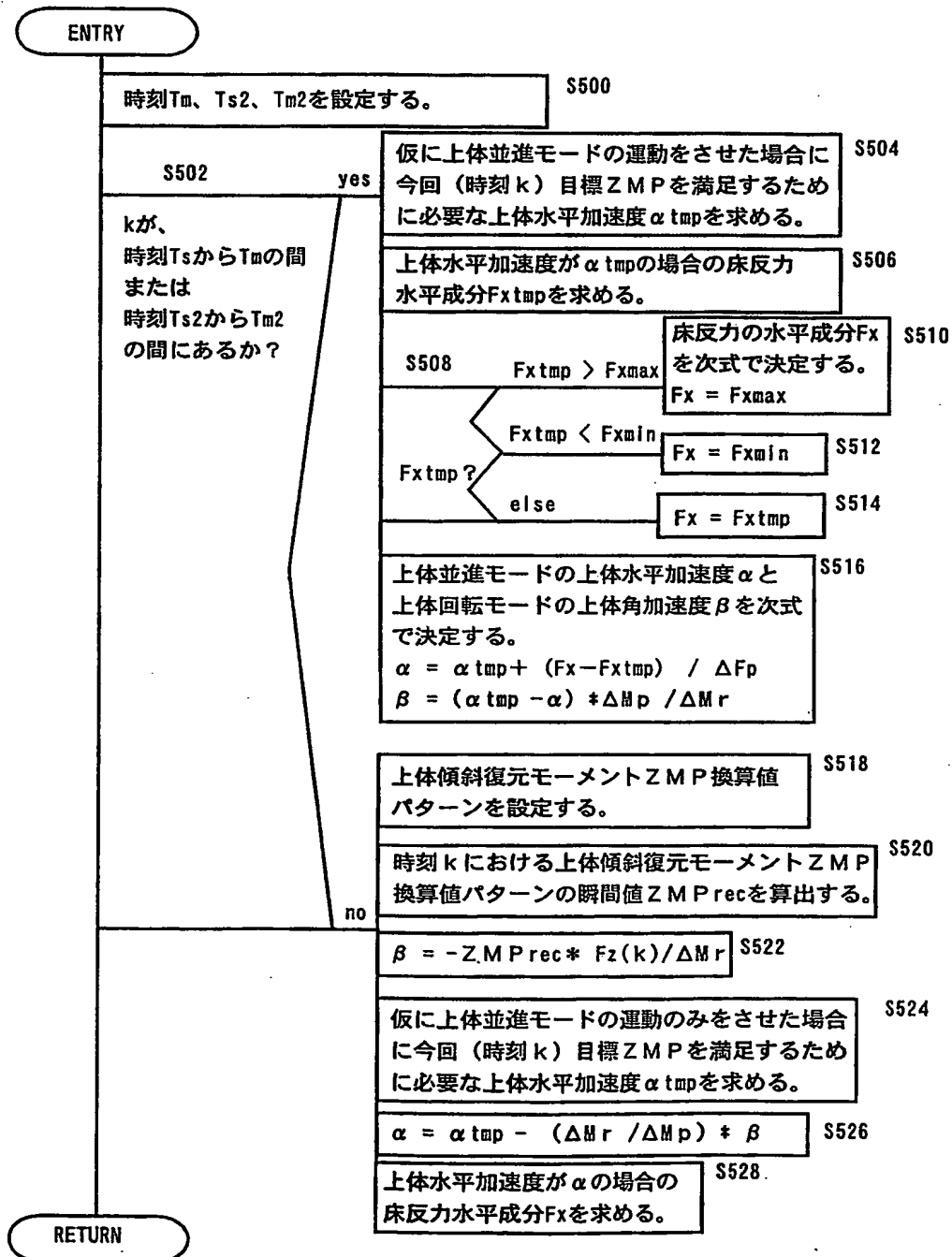
(定常歩容瞬時値決定処理)



19/51

FIG. 22

(定常歩容の上体水平加速度／上体姿勢角加速度決定処理)



20/51

FIG. 23

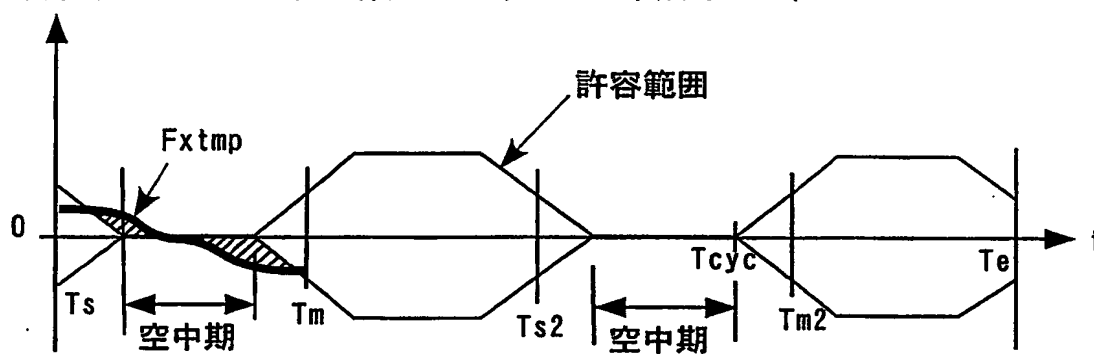
許容範囲を考慮せずに作成した床反力水平成分 $F_{xtmp}$ 

FIG. 24

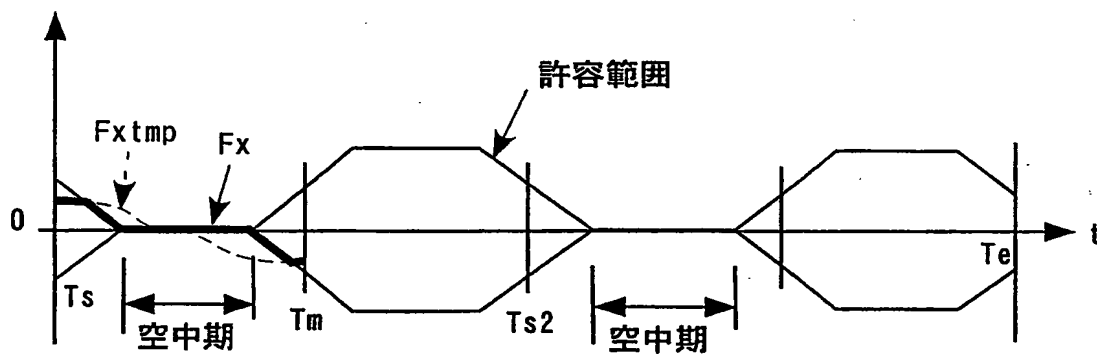
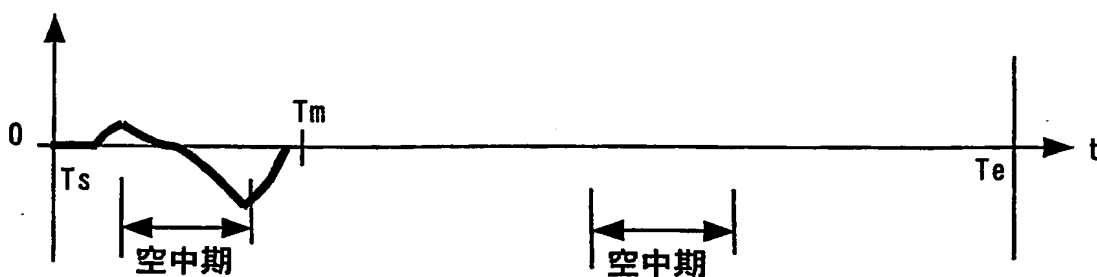
床反力水平成分許容範囲を考慮した床反力水平成分 $F_x$ 

FIG. 25

上体傾斜角加速度 $\beta$ 

21/51

FIG. 26

上体傾斜復元モーメントZMP換算値 (ZMPrec)

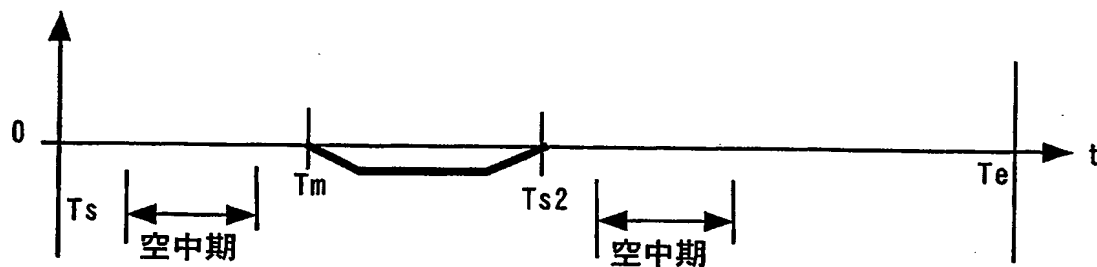


FIG. 27

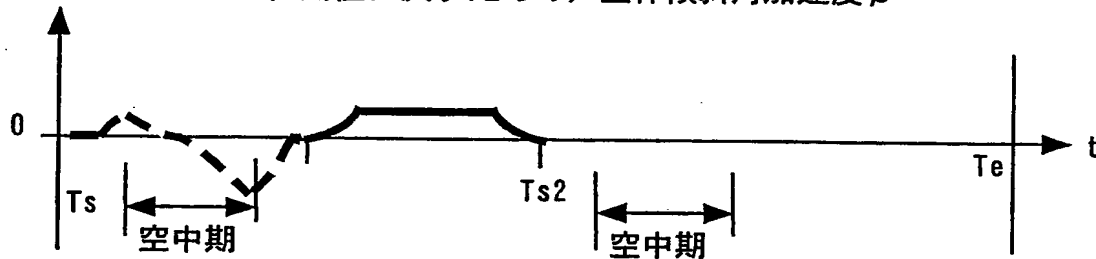
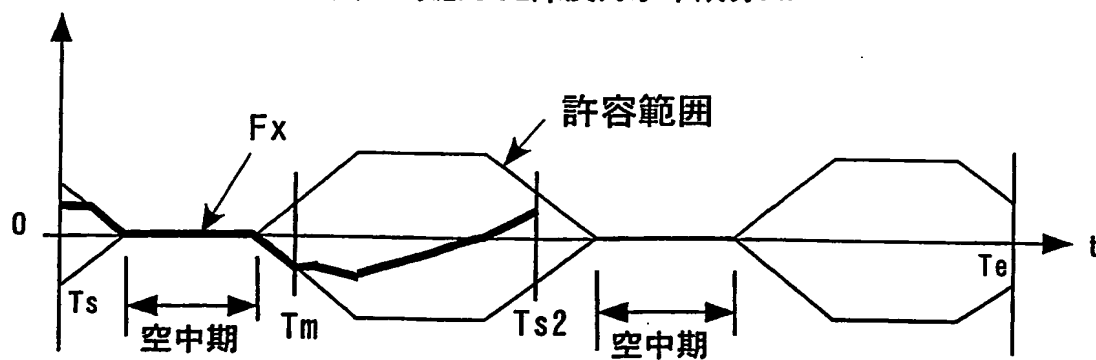
(上体傾斜速度を初期値に戻すための) 上体傾斜角加速度  $\beta$ 

FIG. 28

床反力水平成分許容範囲を考慮した床反力水平成分  $F_x$ 

22/51

FIG. 29

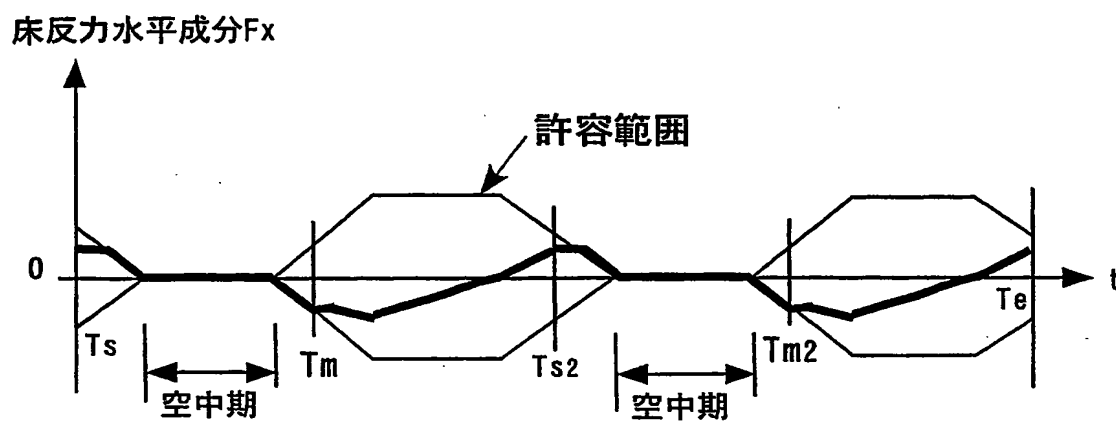
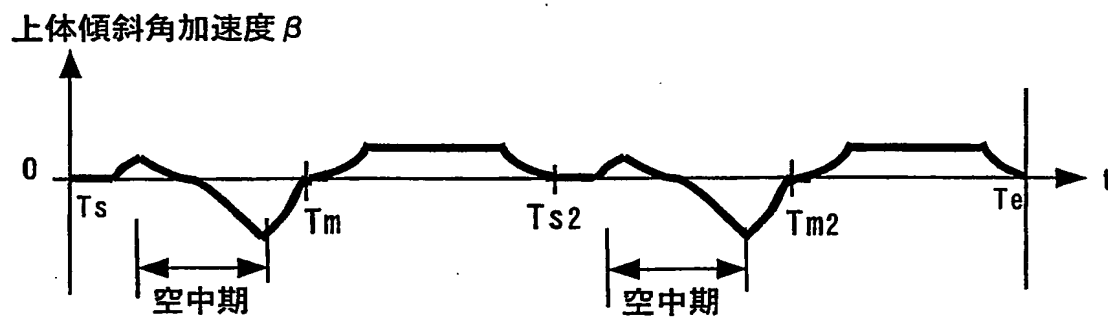


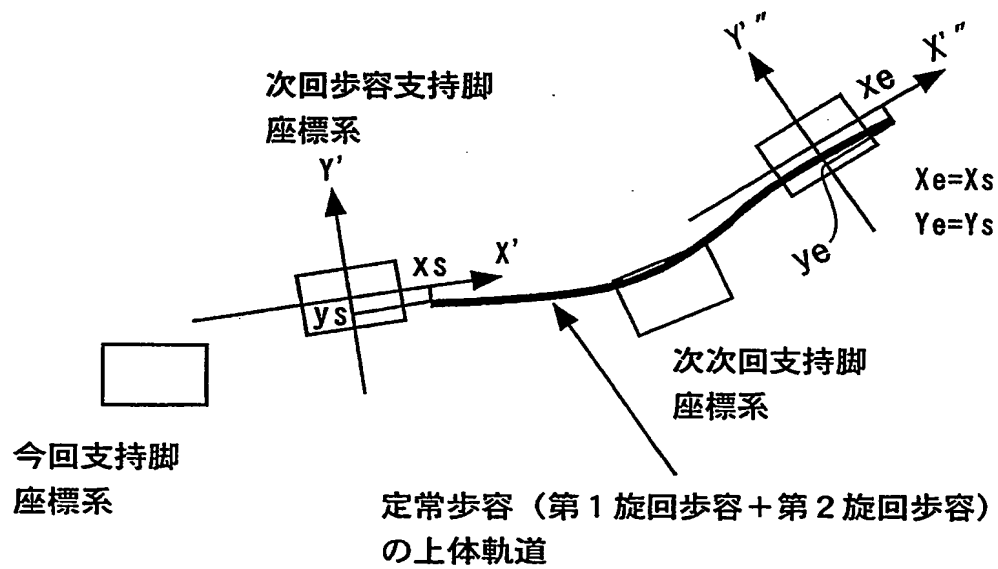
FIG. 30



23/51

FIG. 31

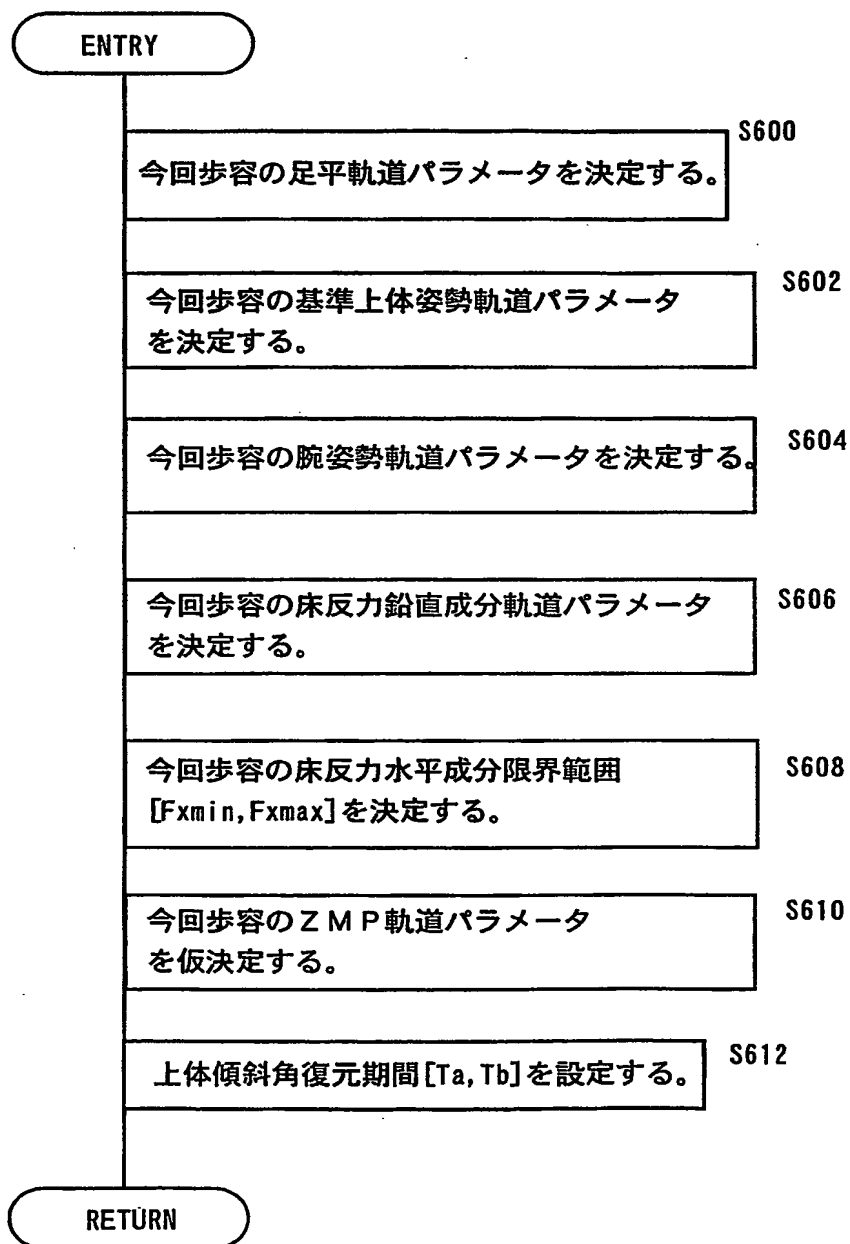
(定常歩容の着地時上体位置の関係)



24/51

FIG. 32

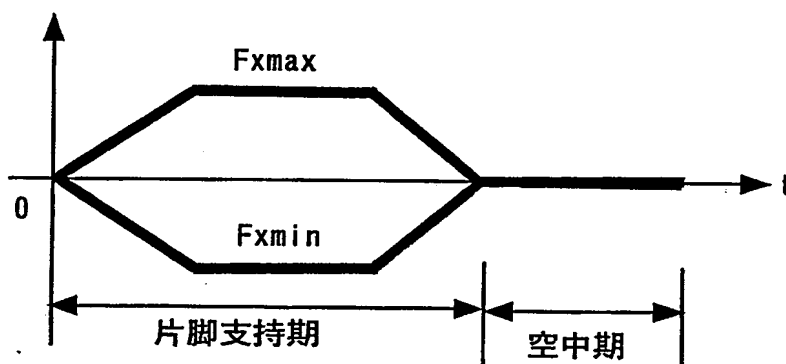
(今回歩容パラメータの仮決定処理)



25/51

FIG. 33  
(床反力水平成分許容範囲)

床反力水平成分許容下限値 $F_{xmin}$ と床反力水平成分許容上限値 $F_{xmax}$

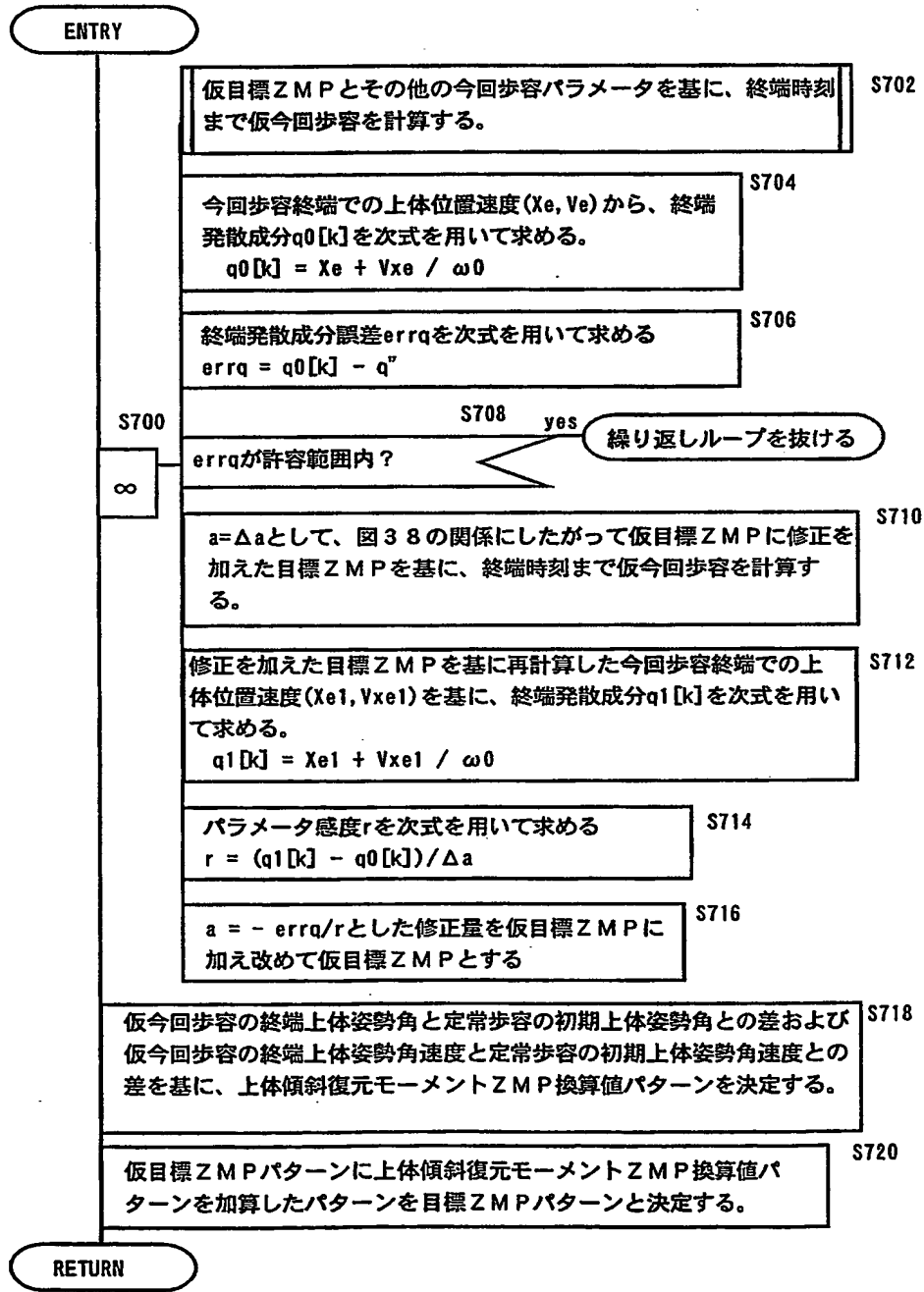




26/51

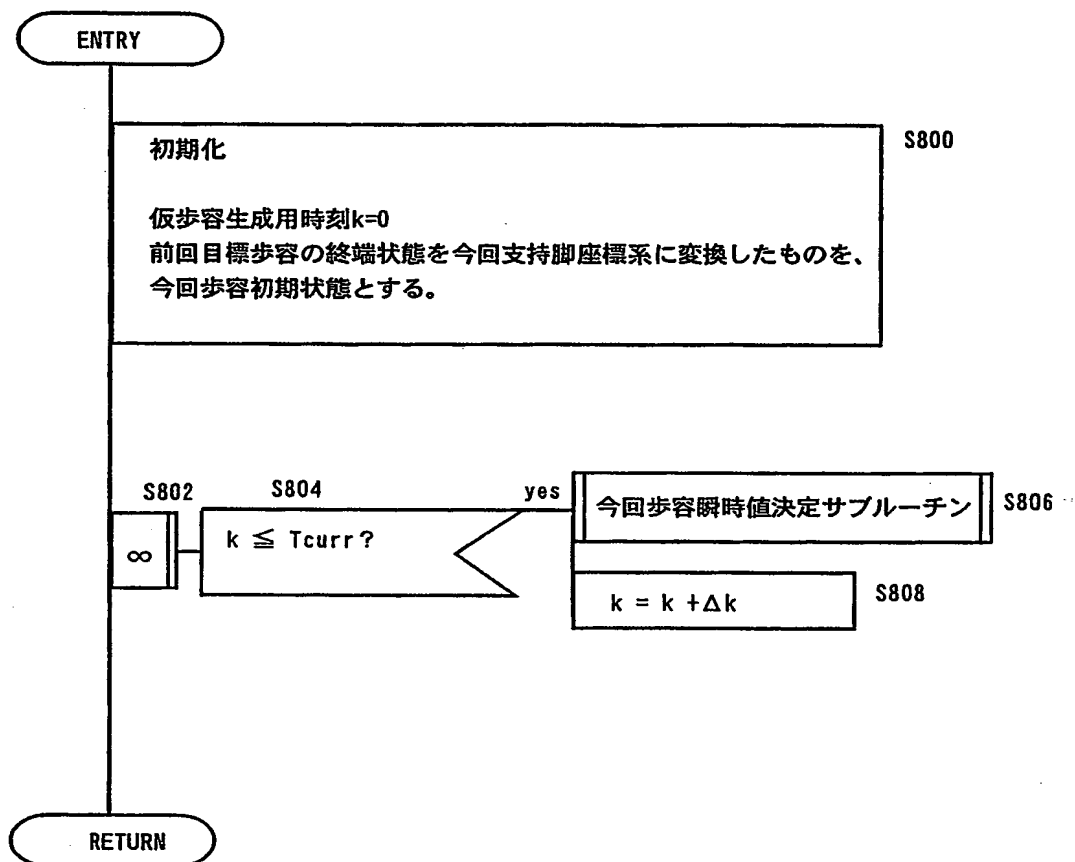
FIG. 34

(探索的な今回歩容パラメータの修正処理)



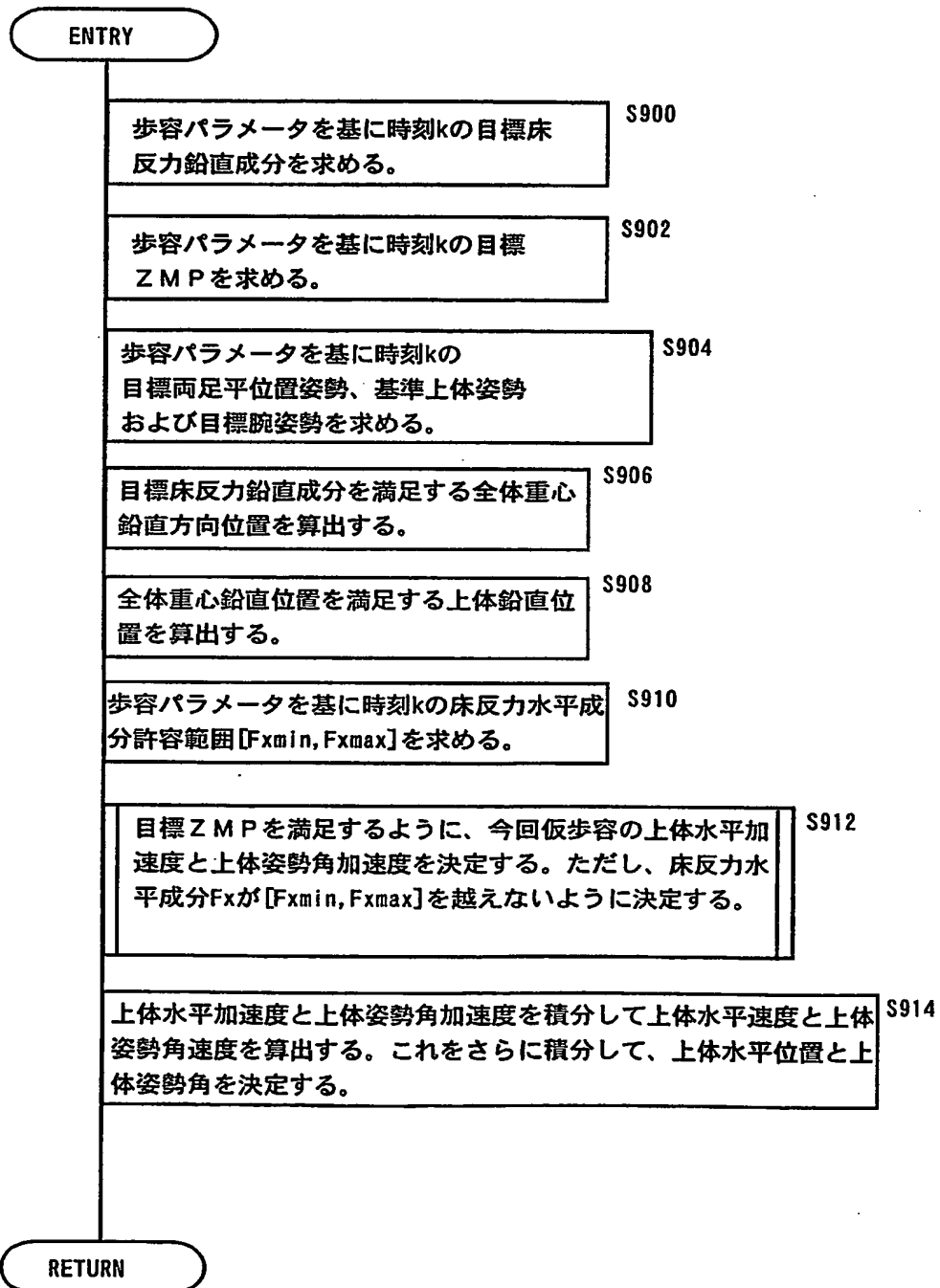
27/51

FIG. 35  
(仮今回歩容生成処理)



28/51

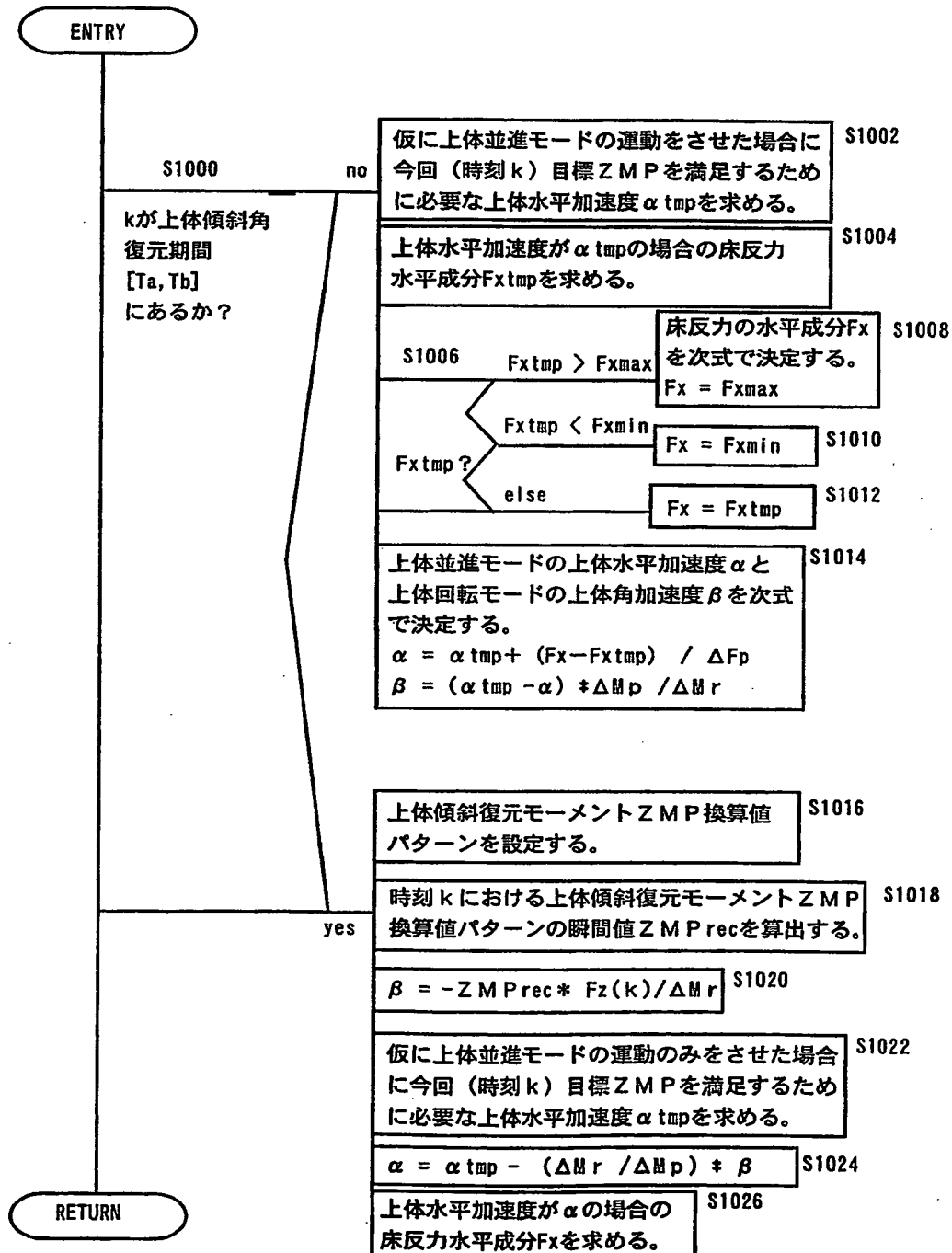
FIG. 36  
(仮今回仮歩容瞬時値決定処理)



29/51

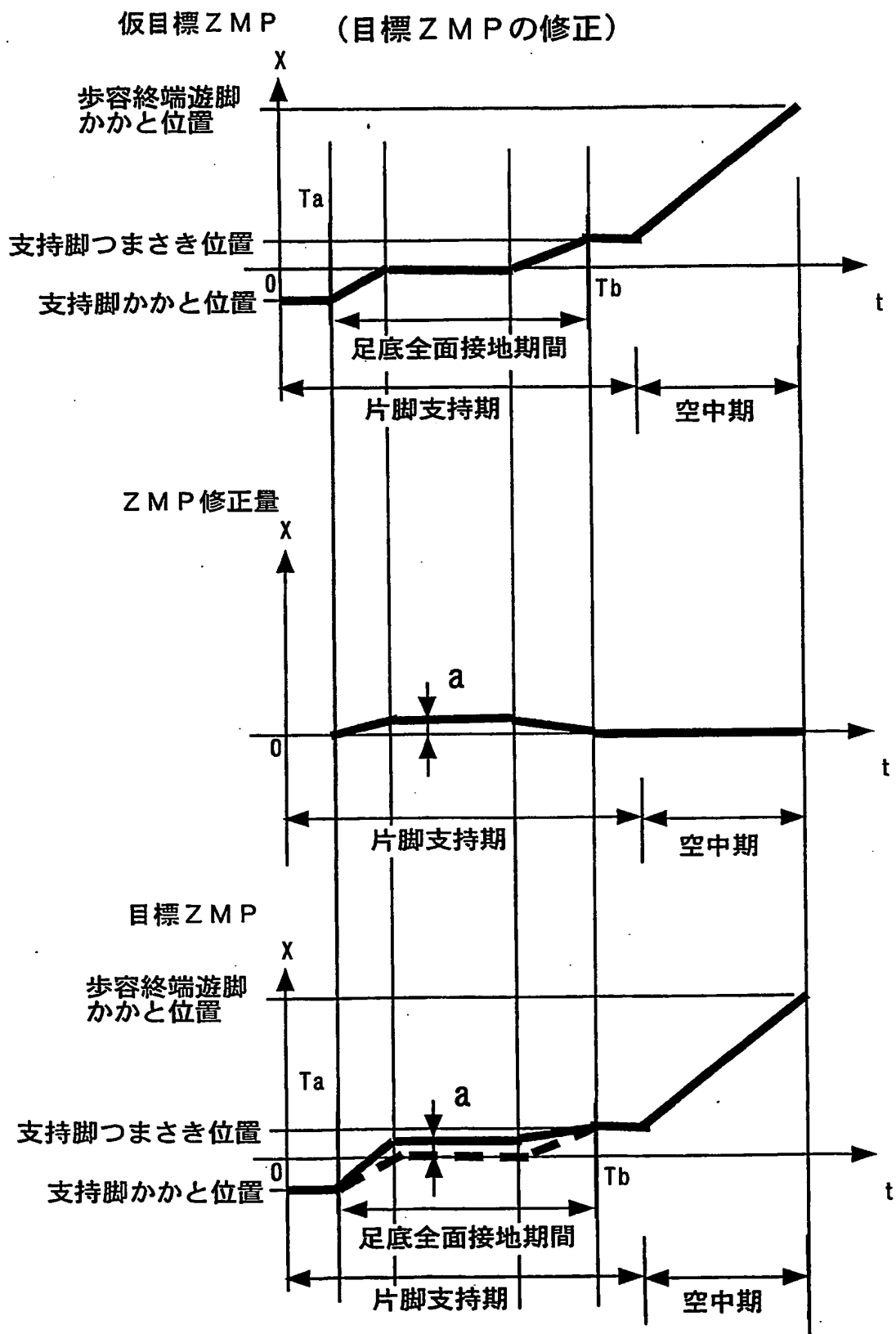
FIG. 37

(仮今回歩容の上体水平加速度／上体姿勢角加速度決定処理)



30/51

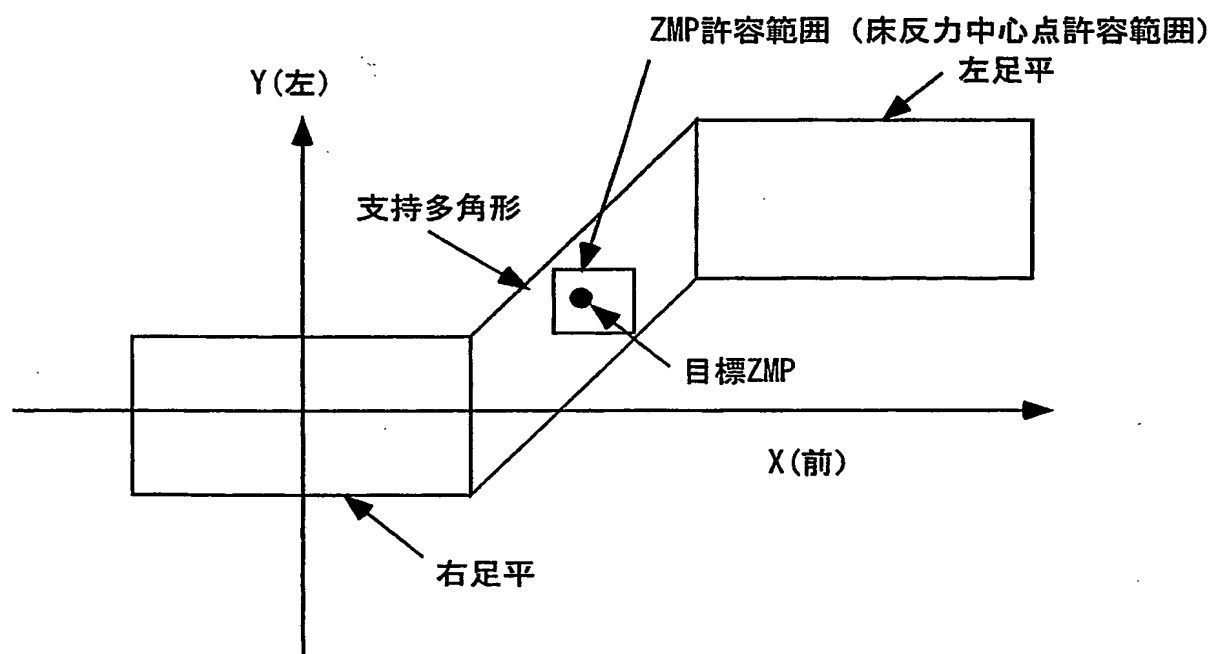
FIG. 38



31/51

FIG. 39

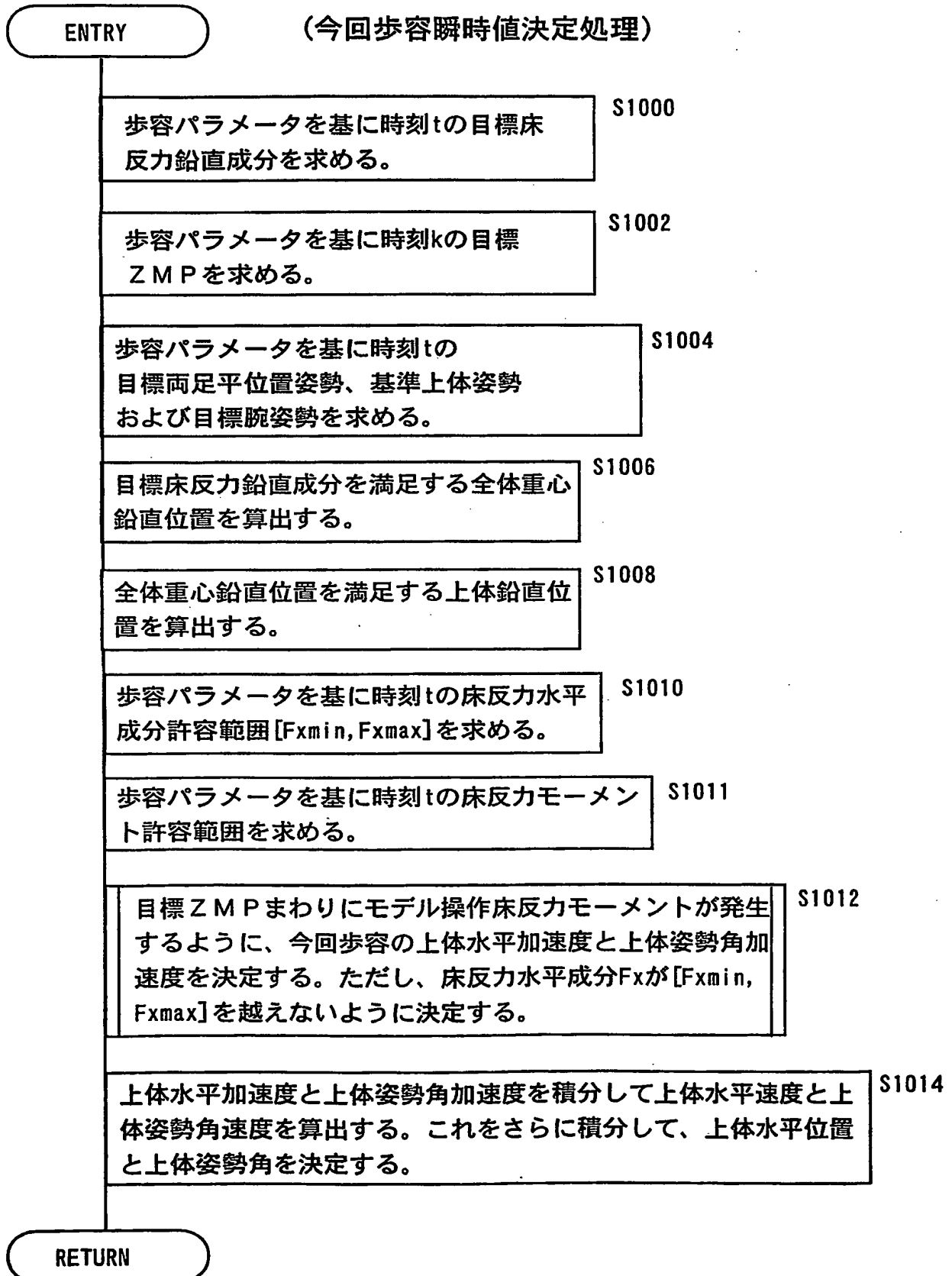
(支持多角形とZMP許容範囲)



32/51

FIG. 40

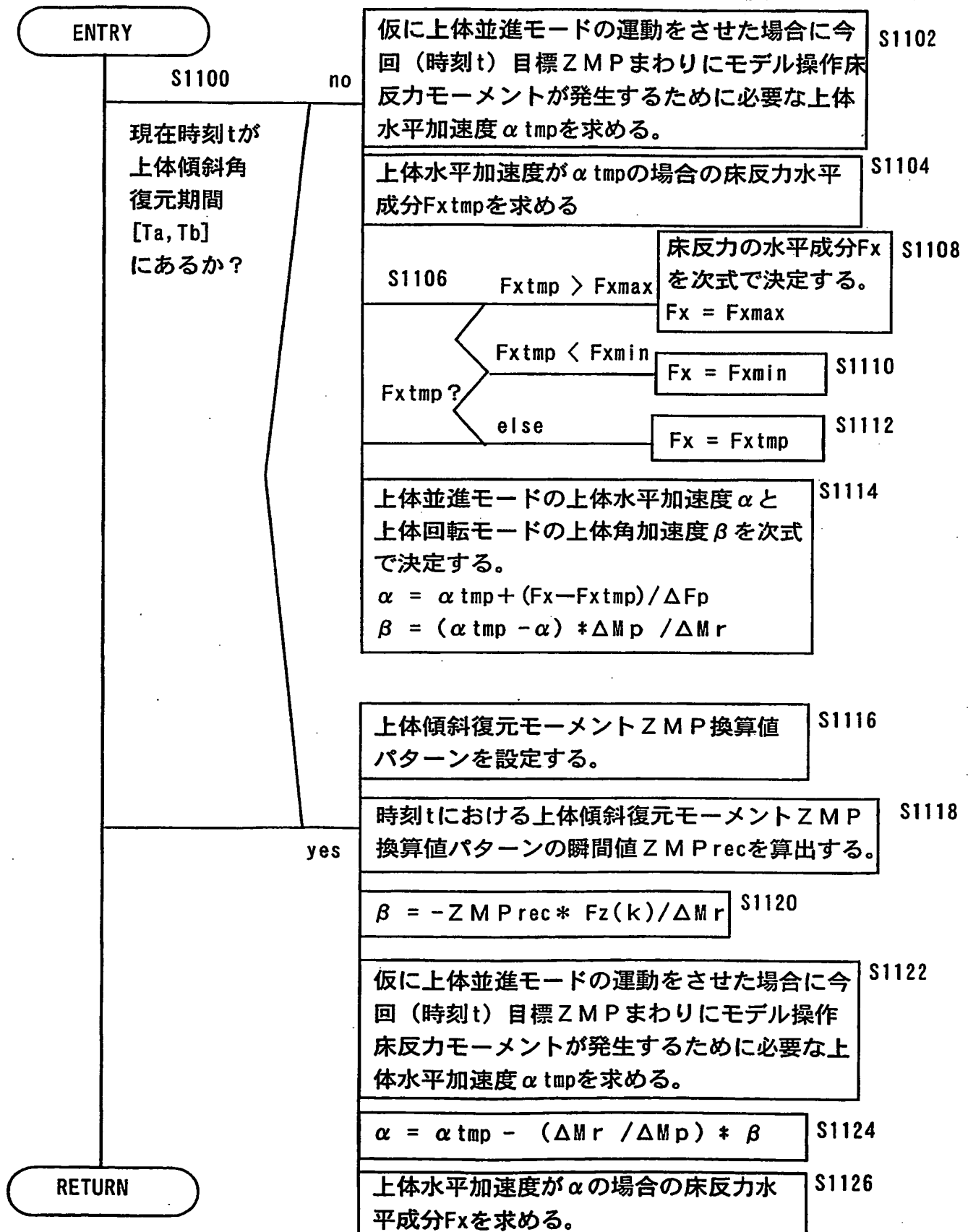
(今回歩容瞬時値決定処理)



33/51

FIG. 41

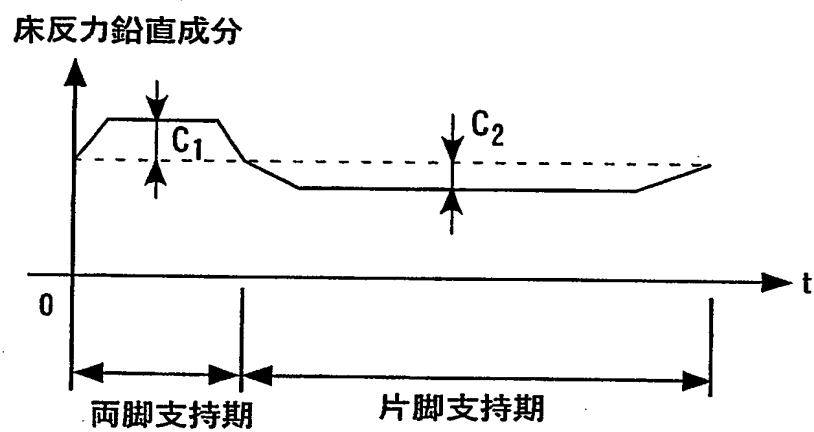
(今回歩容の上体水平加速度／上体姿勢角加速度の決定処理)



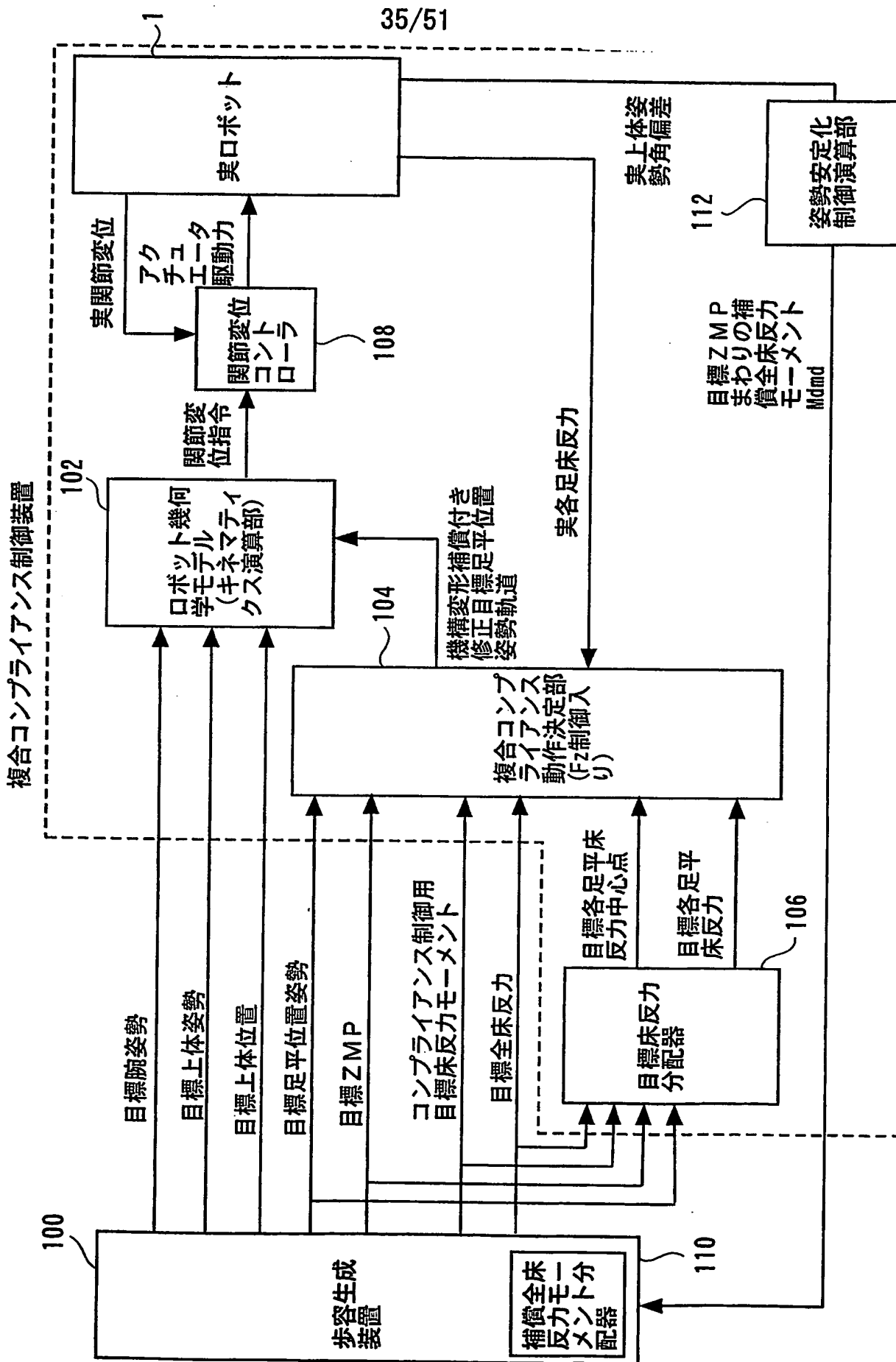


34/51

FIG. 42  
(歩行時目標床反力鉛直成分)



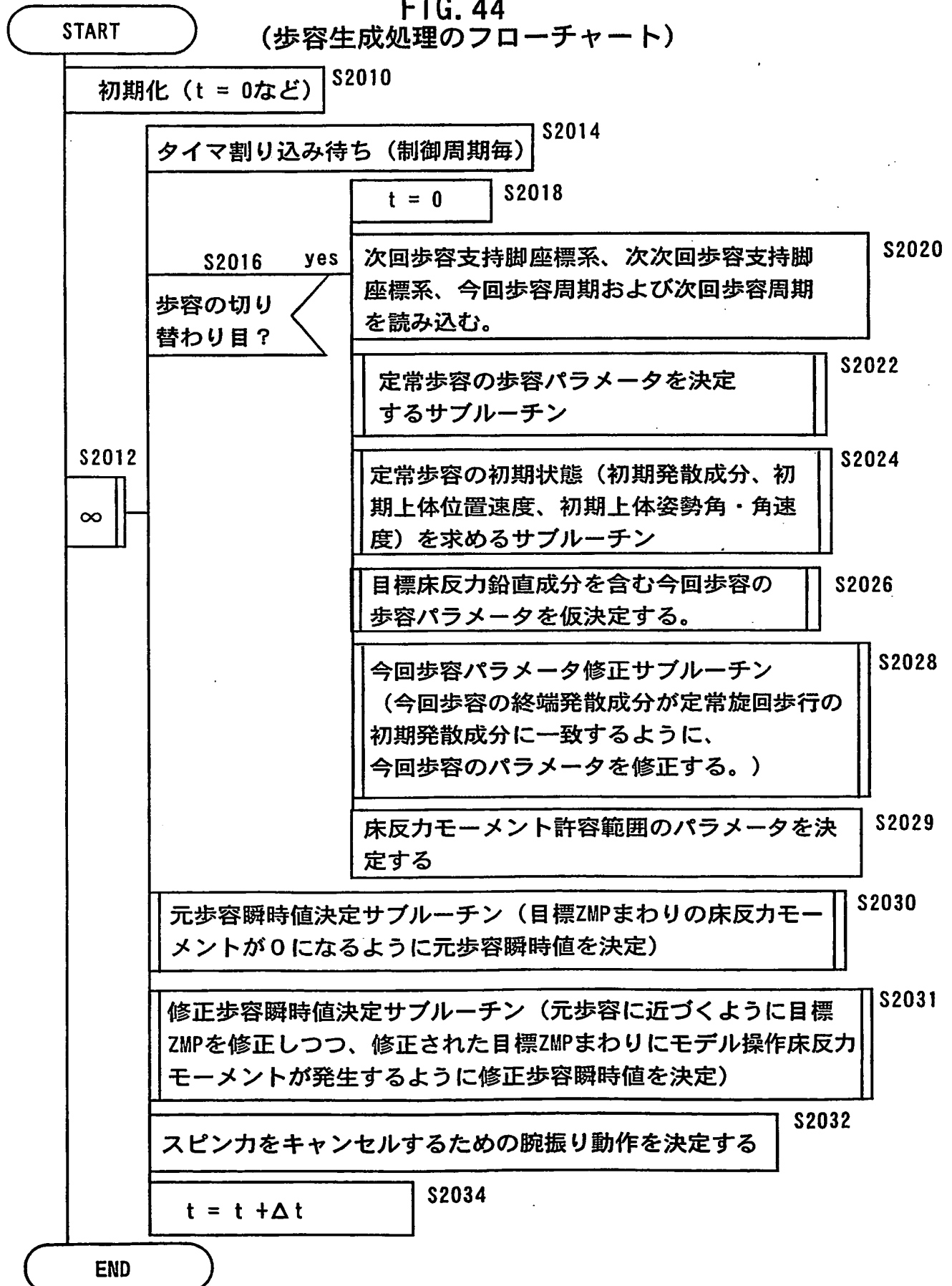
**FIG. 43**



36/51

FIG. 44

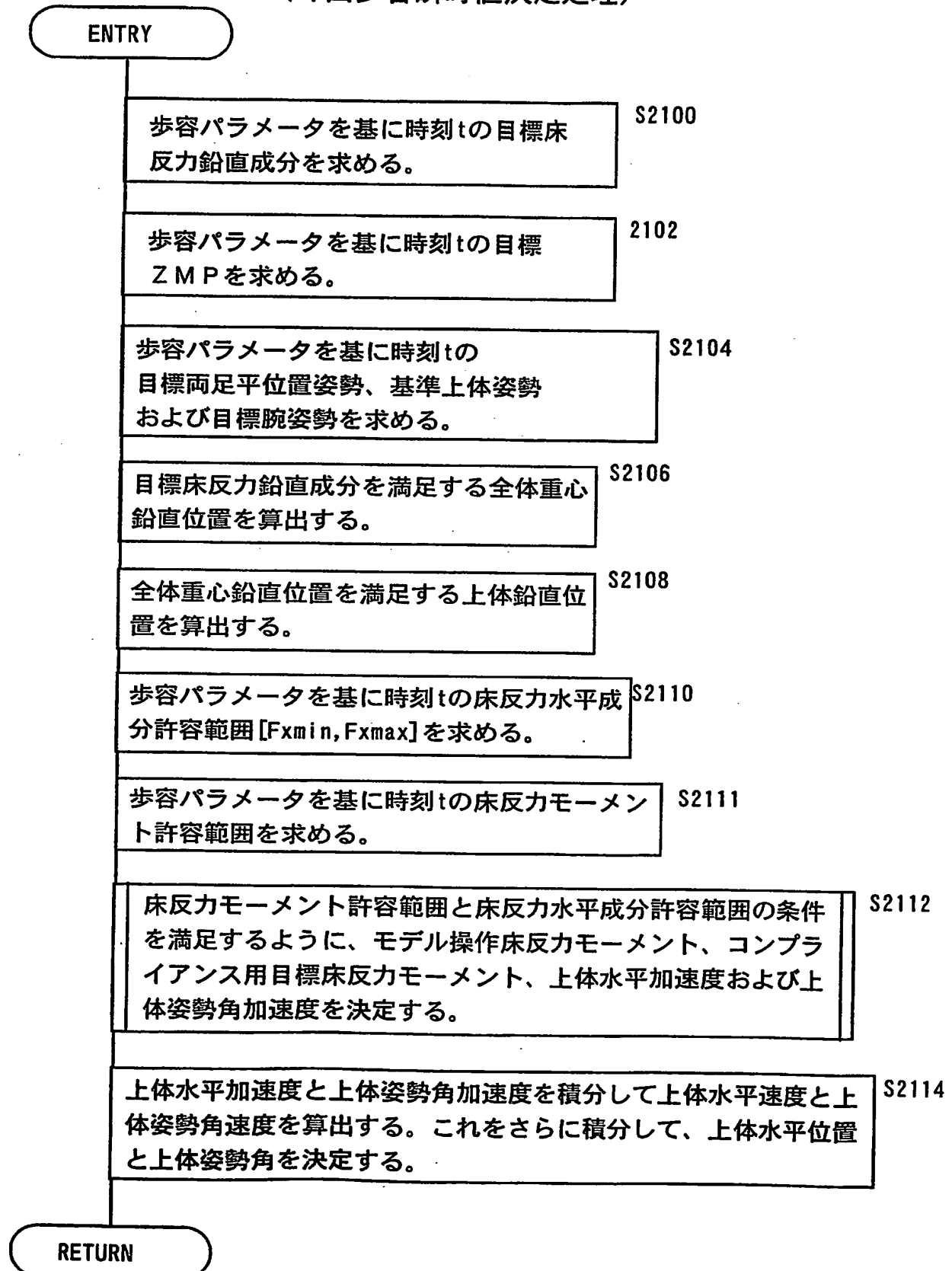
(歩容生成処理のフローチャート)



37/51

FIG. 45

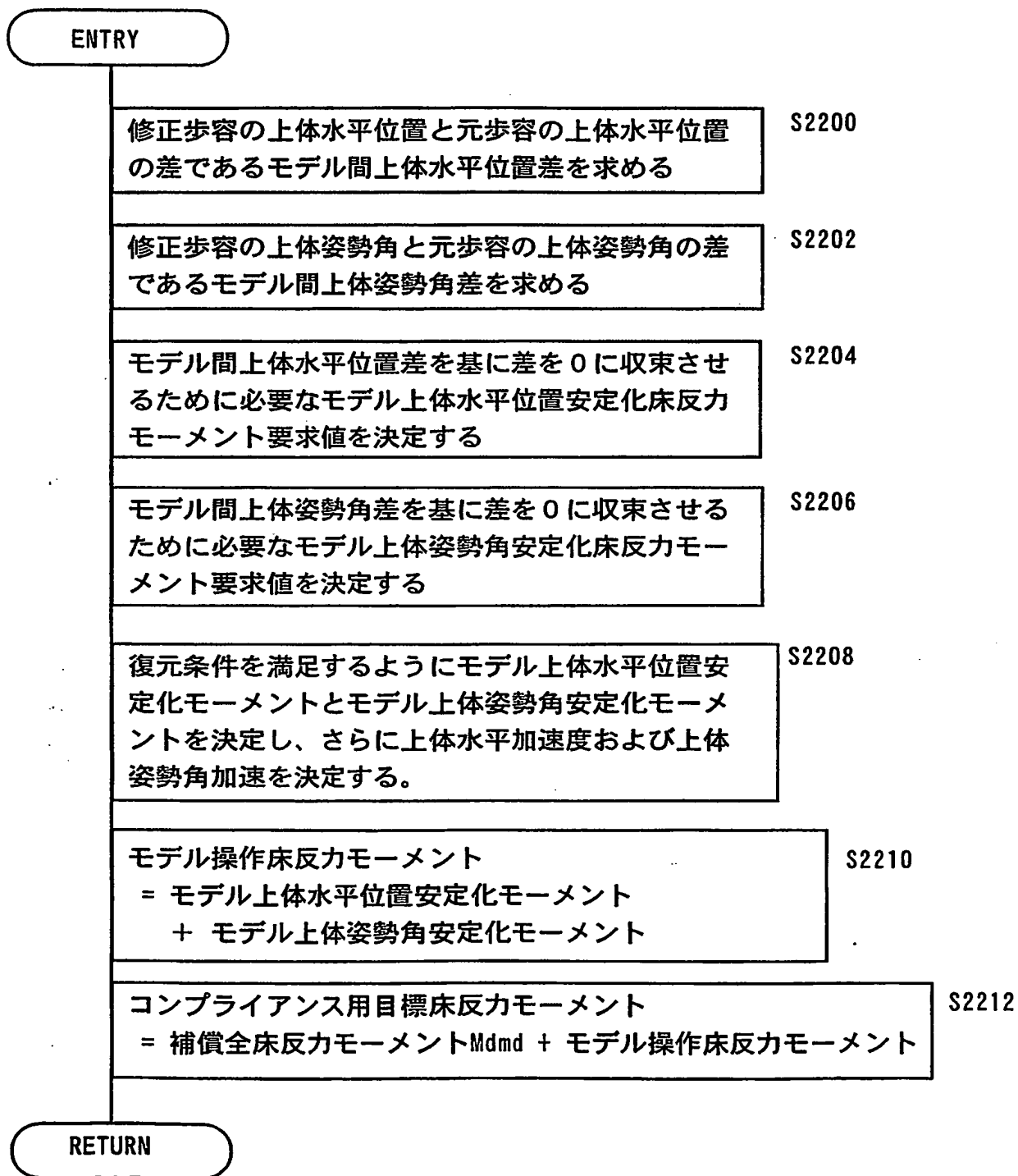
(今回歩容瞬時値決定処理)



38/51

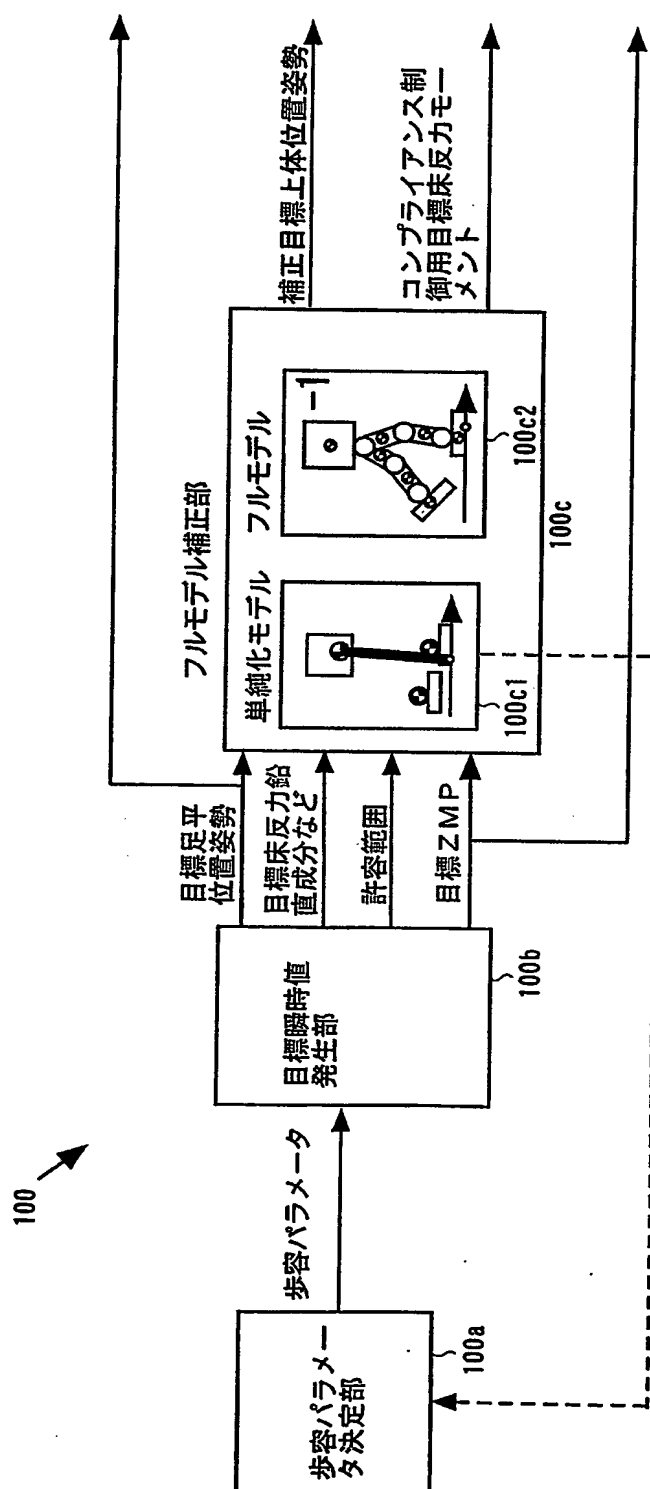
FIG. 46

(上体水平加速度／上体姿勢角加速度決定処理)



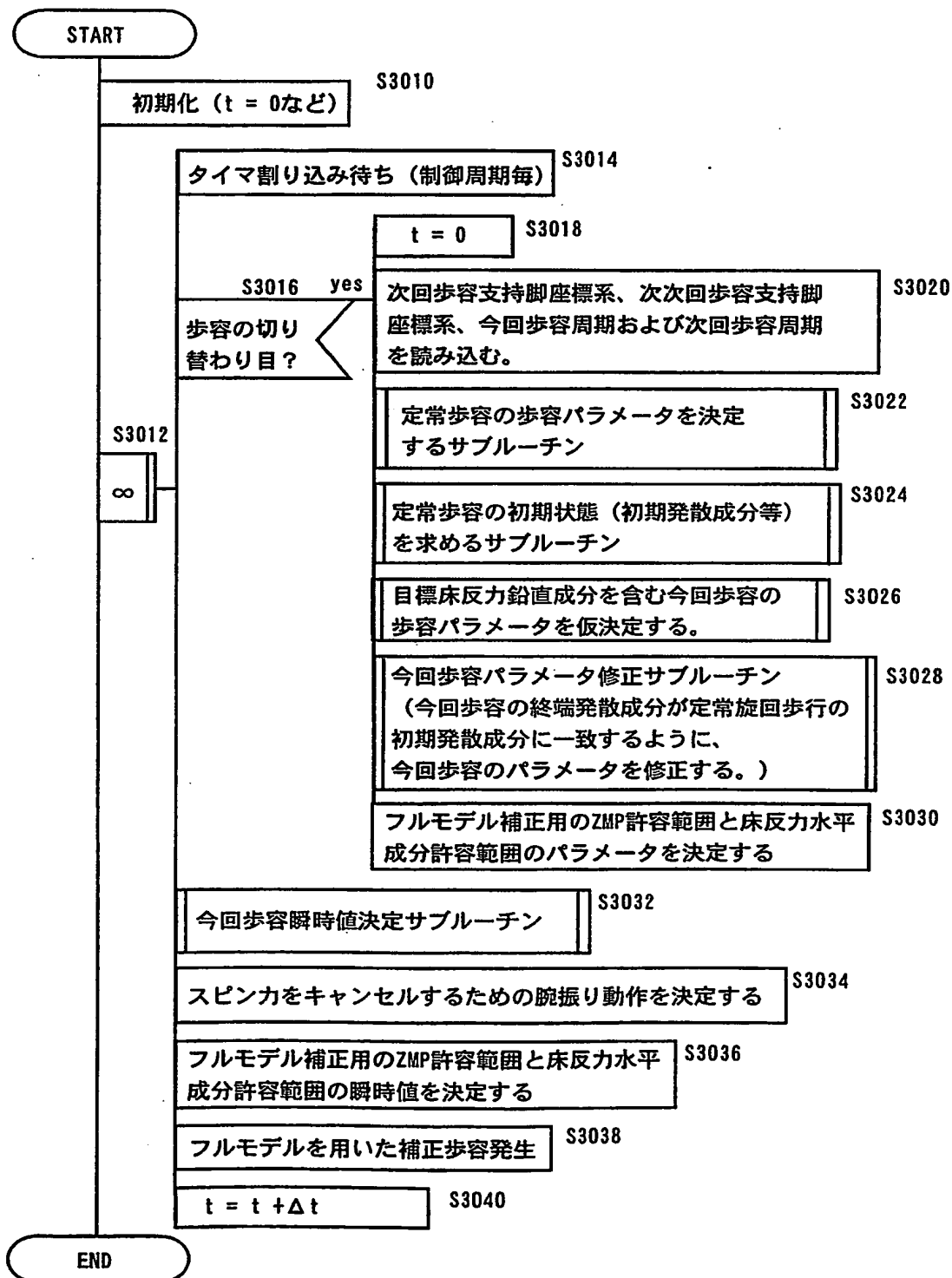
39/51

FIG. 47  
(フルモデル補正入り歩容生成装置の機能ブロック図)



40/51

FIG. 48  
(歩容生成処理のフローチャート)







42/51

FIG. 50  
(上体水平位置補正用摂動モデル)

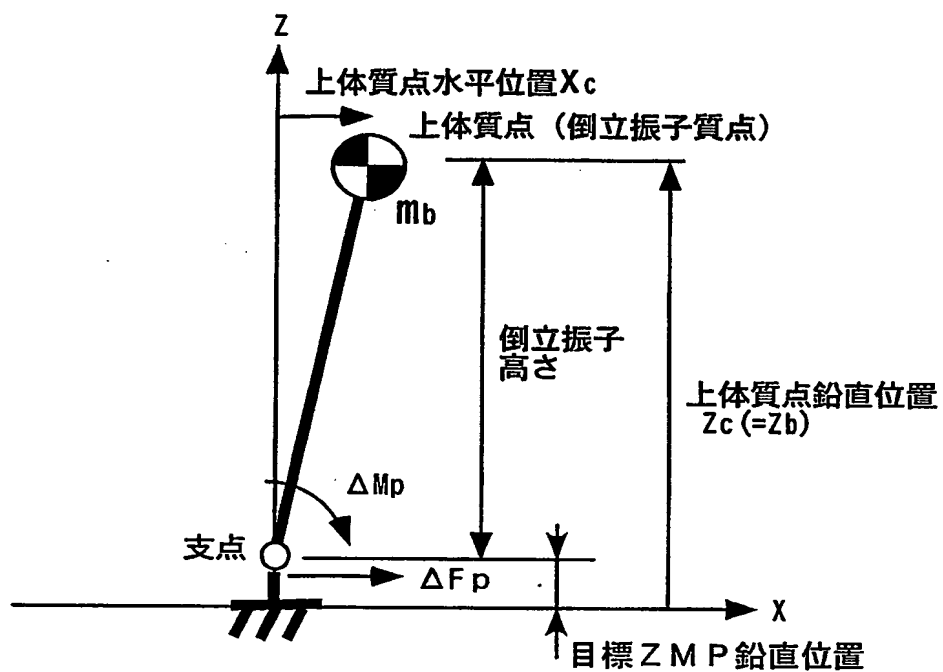
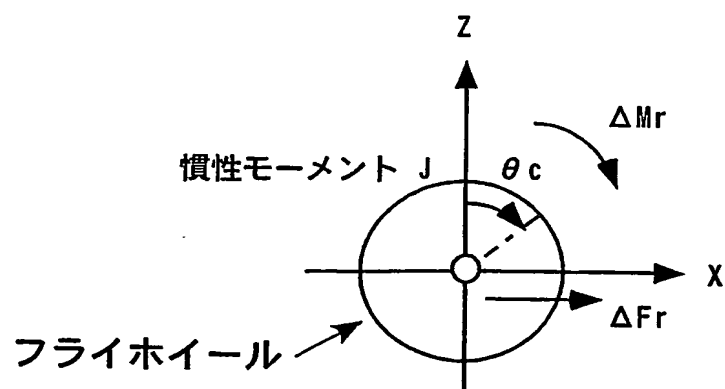


FIG. 51  
(上体姿勢角補正用摂動モデル)



43/51

FIG. 52

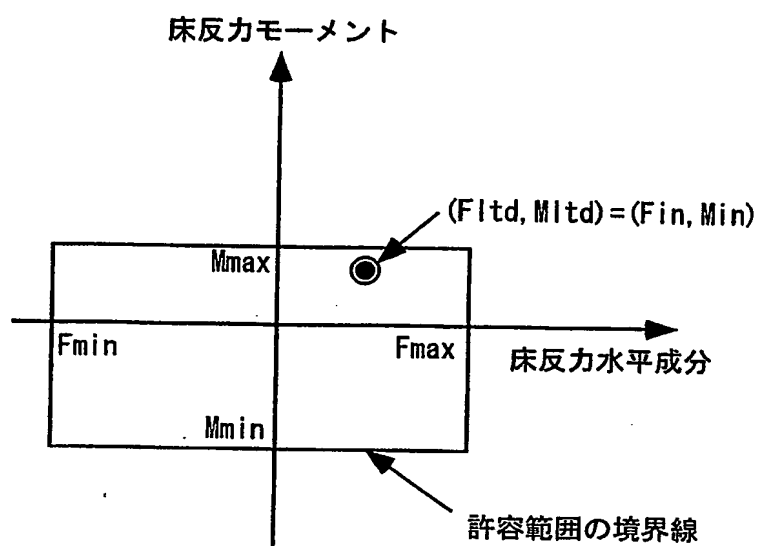
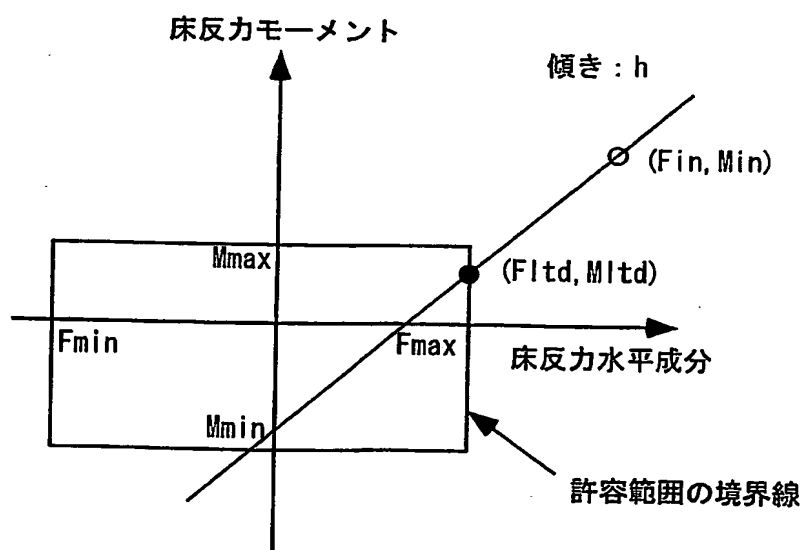


FIG. 53



44/51

FIG. 54

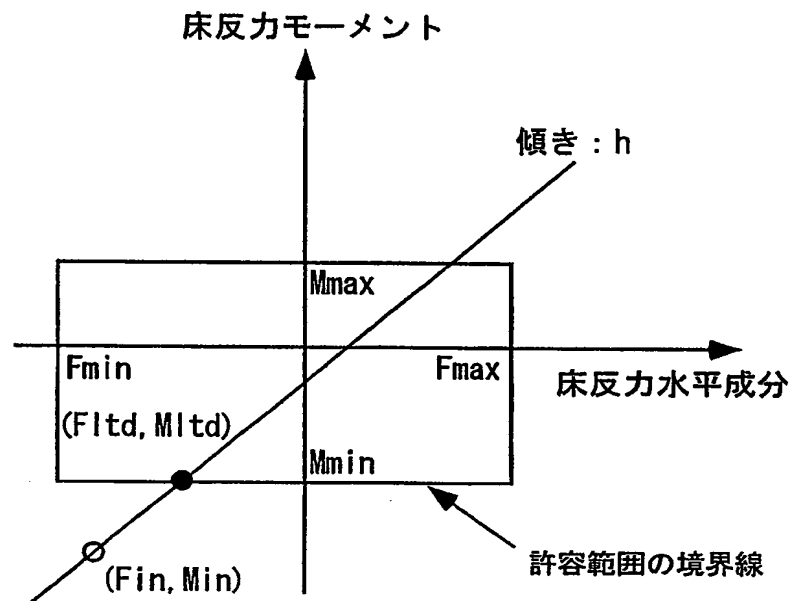
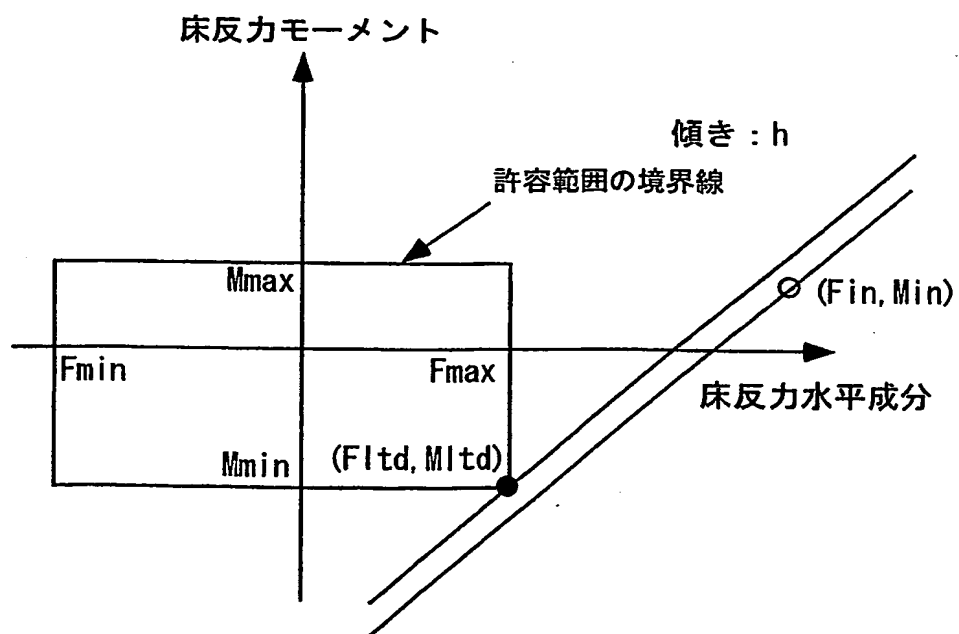
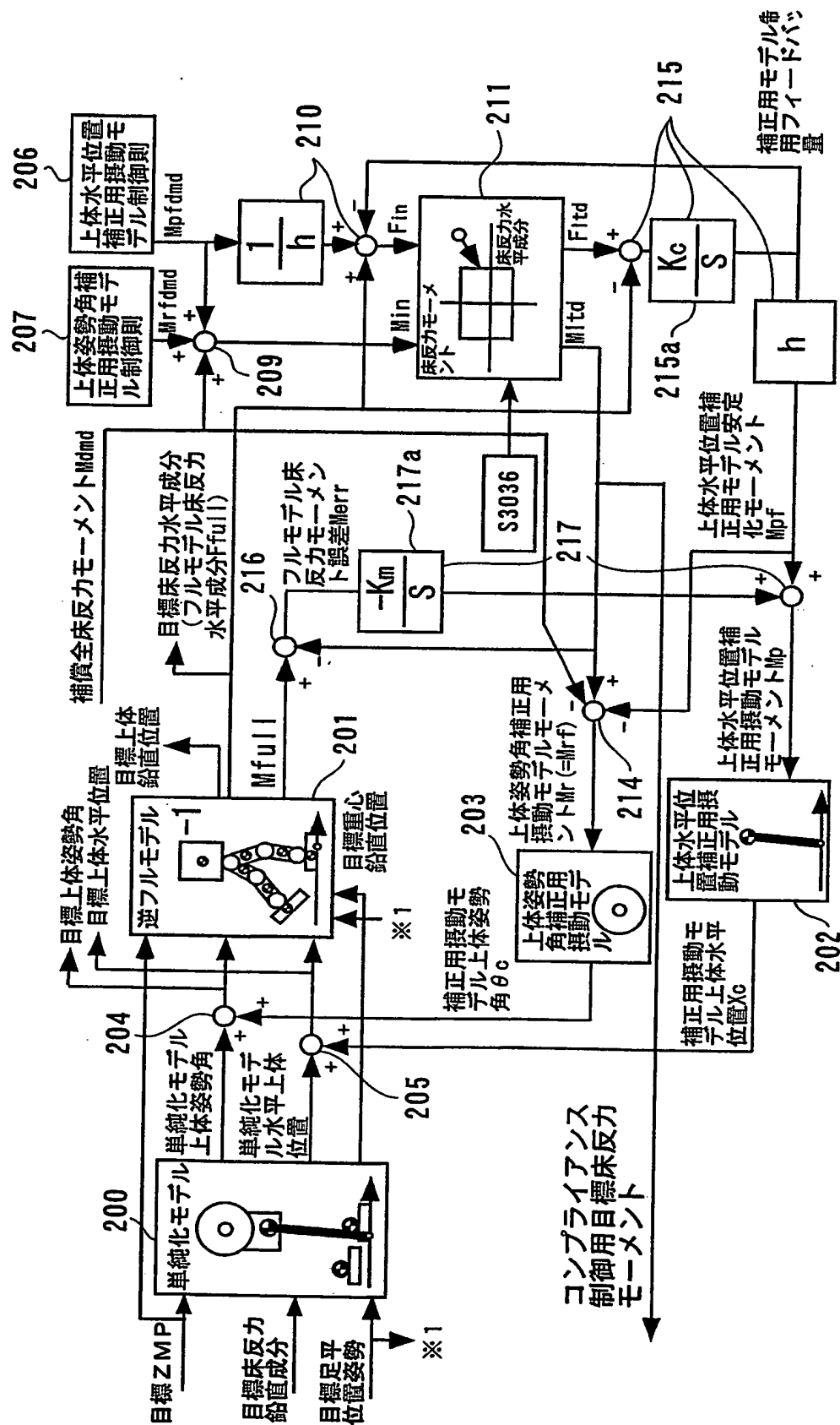


FIG. 55



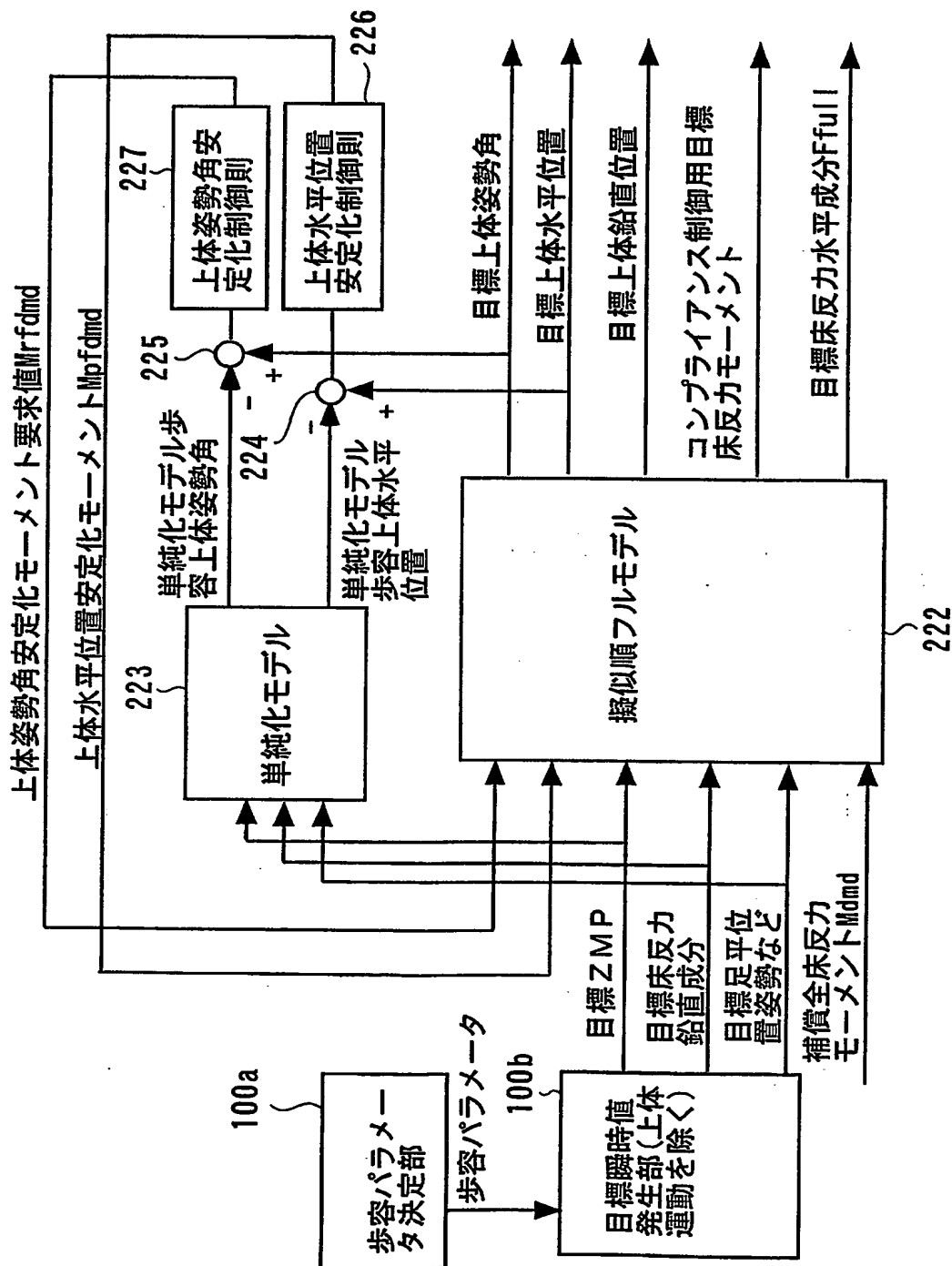
**FIG. 56**

(逆動力学フルモデルを使う補正、単純化モデル歩容の入力を補正しない方式、フルモデルFB補正型)



46/51

FIG. 57  
(順フルモデルを用いた歩容補正)

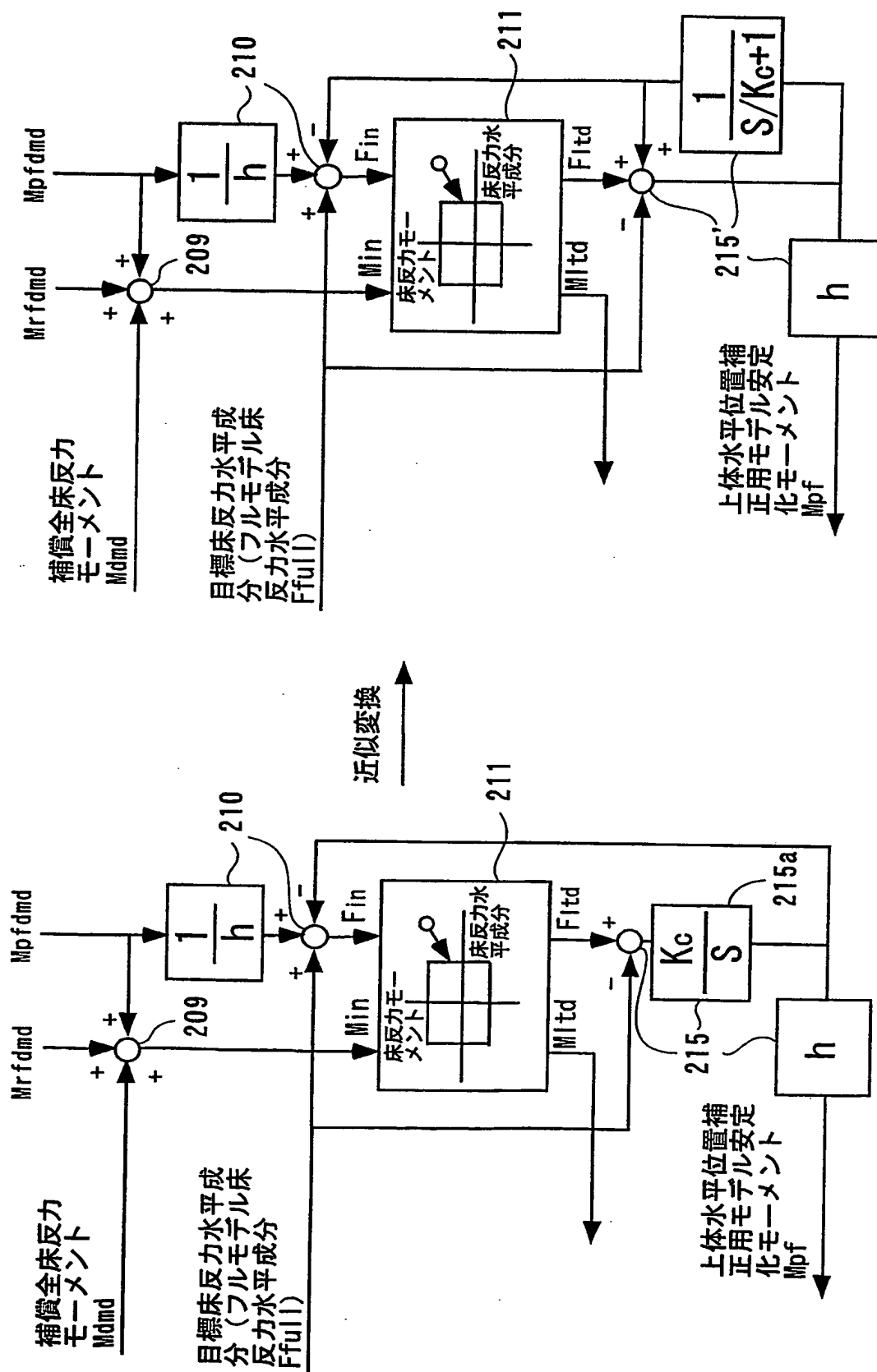






49/51

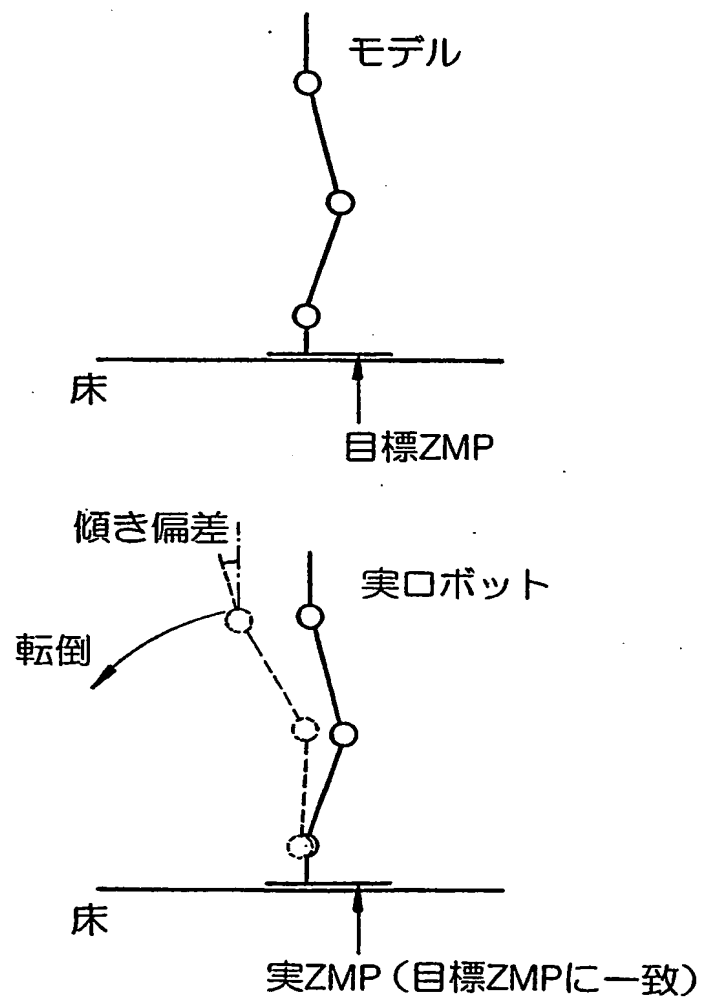
FIG. 60  
(制限手段の近似変換)





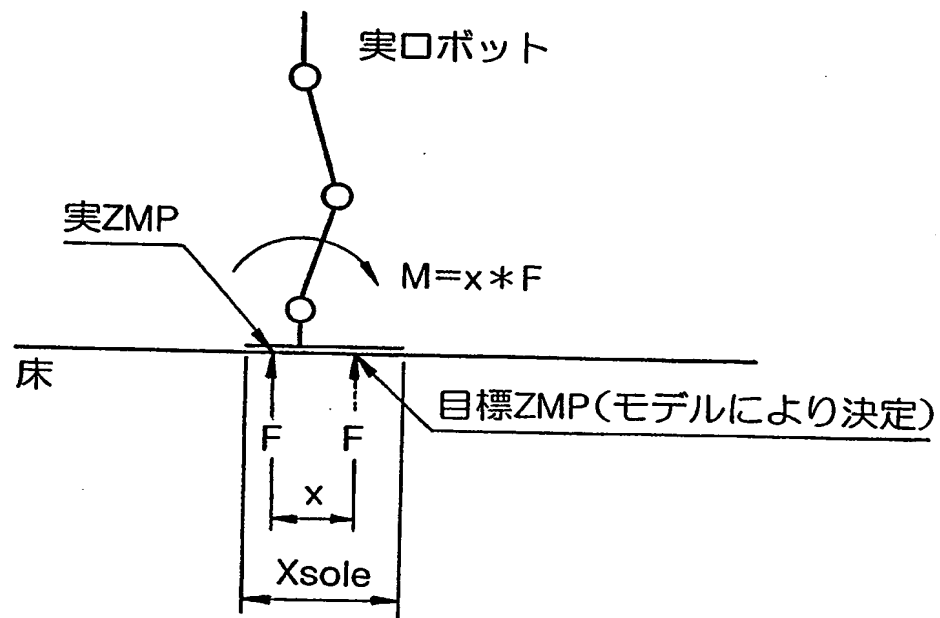
50/51

FIG. 61



51/51

FIG. 62



# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP03/00435

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER  
Int.Cl<sup>7</sup> B25J5/00

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

## B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)  
Int.Cl<sup>7</sup> B25J1/00-21/02

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched  
Jitsuyo Shinan Koho 1926-1996 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2003  
Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2003

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)  
JOIS (JICST)

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	WO 01/087548 A1 (HONDA GIKEN KOGYO KABUSHIKI KAISHA), 22 November, 2001 (22.11.01), Full text; all drawings & JP 2001-322076 A	1-23
A	EP 1120203 A (HONDA GIKEN KOGYO KABUSHIKI KAISHA), 19 April, 1999 (19.04.99), Full text; Figs. 1 to 37 & JP 11-300660 A & WO 99/054095 A & US 6289265 B	1-23

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☐ See patent family annex.

\* Special categories of cited documents:  
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance  
"E" earlier document but published on or after the international filing date  
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)  
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means  
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention  
"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone  
"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art  
"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search  
04 April, 2003 (04.04.03)

Date of mailing of the international search report  
22 April, 2003 (22.04.03)

Name and mailing address of the ISA/  
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

## A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))

Int Cl<sup>7</sup> B25J5/00

## B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))

Int Cl<sup>7</sup> B25J1/00-21/02

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報 1926-1996年

日本国登録実用新案公報 1994-2003年

日本国公開実用新案公報 1971-2003年

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)  
JOIS (JICST)

## C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
A	WO 01/087548 A1 (HONDA GIKEN KOGYO KABUSHIKI KAISHA), 2001. 11. 22, 全文, 全図 & JP 2001-322076 A	1-23
A	EP 1120203 A (HONDA GIKEN KOGYO KABUSHIKI KAISHA), 1999. 04. 19, 全文, 図1-37 & JP 11-300660 A & WO 99/054095 A & US 6289265 B	1-23

☐ C欄の続きにも文献が列挙されている。☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

## \* 引用文献のカテゴリー

「A」 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの

「E」 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの

「L」 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)

「O」 口頭による開示、使用、展示等に関する文献

「P」 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの

「X」 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの

「Y」 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの

「&amp;」 同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

04.04.03

国際調査報告の発送日 22.04.03

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA/JP)

郵便番号100-8915

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)

八木 誠



3C

9348

電話番号 03-3581-1101 内線 3324